

CT 利用半導体レーザ吸収法を用いた
2次元温度・濃度計測技術に関する研究

2016年 3月
徳島大学大学院
先端技術科学教育学部
知的力学システム工学専攻
機械創造システム工学コース
神本 崇博

目次

第1章 緒言	2
1.1 動向	
1.2 2次元温度・濃度計測の必要性	
1.3 CT利用半導体レーザ吸収法の適用	
第2章 理論	5
2.1 吸収法(Absorption Spectroscopy)	
2.2 ブロードニング関数	
2.3 吸収スペクトルと温度・濃度計測	
2.4 半導体レーザ吸収法(Diode Laser Absorption Spectroscopy)	
2.5 CT利用半導体レーザ吸収法	
第3章 実験内容	20
3.1 温度計測基礎データベース構築	
3.2 濃度計測基礎データベース構築	
3.3 CT-半導体レーザ吸収法を用いた2次元温度・濃度分布計測装置開発	
3.4 2次元温度分布計測特性評価	
3.5 2次元濃度分布計測特性評価	
3.6 開発用燃焼炉を用いた微粉炭燃焼場における2次元温度分布計測	
3.7 ガスタービン燃焼器モデルを用いた2次元メタン分布計測	
第4章 実験結果・考察	42
4.1 温度計測基礎データベース構築	
4.2 濃度計測基礎データベース構築	
4.3 CT-半導体レーザ吸収法を用いた2次元温度・濃度分布計測装置開発	
4.4 2次元温度分布計測特性評価	
4.5 2次元濃度分布計測特性評価	
4.6 開発用燃焼炉を用いた微粉炭燃焼場における2次元温度分布計測	
4.7 ガスタービン燃焼器モデルを用いた2次元メタン分布計測	
第5章 結言	103
参考文献	
謝辞	

第1章 緒言

1.1 動向

様々な分野で地球環境保全やエネルギーの有効利用に意識を向けることが当然となる中で、地球温暖化物質や環境汚染物質の排出低減技術、高効率燃焼技術のさらなる発展が望まれる。また、2011年3月の原子力発電事故や新型天然ガスの導入により、火力発電の重要性が再認識されてきている。このような背景から、エンジンやバーナ等のように燃焼現象を工学的に応用する場において、燃焼構造やその過渡的な振舞いをよりいっそう詳しく解明することが急務となっている。このニーズに対応するためには、温度分布や各種成分濃度分布を可視化し、燃焼器内あるいは流入・流出過程の燃焼構造を明らかにすることが必要である^[1]。

1.2.2 次元温度・濃度計測技術の必要性

燃焼現象の要素の中でも、温度・濃度はプロセス制御する上で非常に重要なパラメータであり、燃焼構造や燃焼機器の性能に大きく影響を及ぼす因子である。エンジン負荷時における排気ガス温度分布やエンジン筒内の燃焼現象の解明、HCやCO等の未燃ガス排出低減等を実現させるために、燃焼ガスにおいて2次元温度・濃度分布を高応答で時系列的に計測することが望まれる。エンジン等のガスの挙動を高応答で捉えることができるようになれば、ボイラやガスタービンなどの燃焼機器への応用展開も可能となり、学術面・産業面の両方に応用展開が期待できる^[1]。

1.3 CT利用半導体レーザ吸収法の適用

近年、非接触で高感度・高応答の計測手段として、ラマン散乱法(Spontaneous Raman Spectroscopy, CARS: Coherent anti-Stokes Raman Spectroscopy)^[2-6]、レーザ誘起蛍光法(LIF: Laser-Induced Fluorescence)^[6-12]、レーザ誘起ブレイクダウン法(LIBS: Laser-Induced Breakdown Spectroscopy)^[13-24]などのレーザ応用計測技術が研究開発されており、それらの中でも安価で耐久性の良い半導体レーザを利用した吸収分光法を活用した高応答・多種成分同時(温度、CO₂、NH₃、NO、CO、CH₄)計測技術の開発が行われている^[1, 25-67]。先行技術の問題点として、以下の項目が挙げられる。

- ・ 単一吸収線でのガス濃度に応じた光強度減衰量で評価を行っているため、環境変動(温度や圧力)により光強度が変化してしまうと正しく評価できない。
- ・ 特定ガス成分濃度センシングには適しているが、複数成分を含むガス雰囲気では適用できない。また、検知できるのは相対ガス濃度で絶対量ではない。

- ・多成分(温度, 複数ガス成分濃度)を計測できない.
- ・バックグラウンドがとりにくい.
- ・高感度化のために 2 個の受光器取り付け機構や受光した信号の中から変調された信号を変調信号と同位相及びずれた位相の同調信号で復調する機構のものは装置が複雑化する.

本研究で開発した半導体レーザ吸収法では計測対象ガス成分の複数の吸収線を含む波長帯を吸収線が存在しない領域も含めて高速走査し, 計測対象ガス成分の吸収スペクトルを得ることができるため, 環境変動(温度や圧力)により光強度が変化しても評価できる. 半導体レーザ吸収法計測装置として実用機器への適用性を考慮し, エンジンへの適用ではエンジン本体や配管を極力加工せず, さまざまな位置の排気管などにセンサを直接取り付け可能な装置構造の開発を行った. このような技術開発により, エンジン筒内などの高温・高圧場における燃焼ガスの温度・各種濃度を kHz レベルの高応答・高感度で計測することが可能となる. しかしながら, 上記技術は計測部の平均値を求める手法であり, 計測断面の分布を求めるまでには至っていない. 従来の温度・濃度計測に用いる熱電対やサンプリング法は点計測で, 温度・濃度分布の計測は困難で, 測定場を乱すなどの弊害, 応答性の観点からも高応答で正確な温度・濃度管理を行うことは難しい. また, 断面の温度分布を計測する方法としてレーザ誘起蛍光法なども適用されているが^[6-12], エンジンなど燃焼機器本体の改造を伴う上, 高速で時系列データを取得することが困難で適用性は限られていた.

本研究では半導体レーザ吸収法に CT(Computed Tomography)を組合せ, 各レーザパスの光吸収量から CT を用いて 2 次元温度・濃度を算出する方法を開発し, エンジンやバーナ等の燃焼器において kHz レベルの 2 次元温度・濃度計測を実証した. 本技術では, 半導体レーザ吸収法に CT (コンピュータトモグラフィ)を組合せ, kHz レベルの高応答性を保持しつつ濃度・温度の断面分布の時系列データ取得を可能にする. 特に, 温度・圧力変化を伴う計測対象場では, 測定対象となる分子の濃度と温度の両方のパラメータを含む CT を行う必要が生じ, 現状の技術レベルでは未だ達成されていない. 本研究では, 多波長の吸収スペクトルを用いた CT を行うことにより, この課題を解決するものである. 半導体レーザ吸収法に CT (コンピュータトモグラフィ)を組合せ, kHz レベルの濃度・温度分布の時系列データ取得を可能にする画期的な内容であり, エンジンやバーナなどの燃焼器内部の 2 次元濃度・温度分布をその変動成分を含めて高応答で捉えることができ, 従来技術では把握できない燃焼機器の燃焼サイクルを詳細に把握可能となり, 燃焼構造の解明や燃焼機器の性能向上などに大きく寄与できる. この様な制御方法にて, NO_x, CO₂, 未燃燃料などの低減や効率向上が図れると, 地球温暖化やエネルギー資源の有効利用にとって大きなメリットとなる.

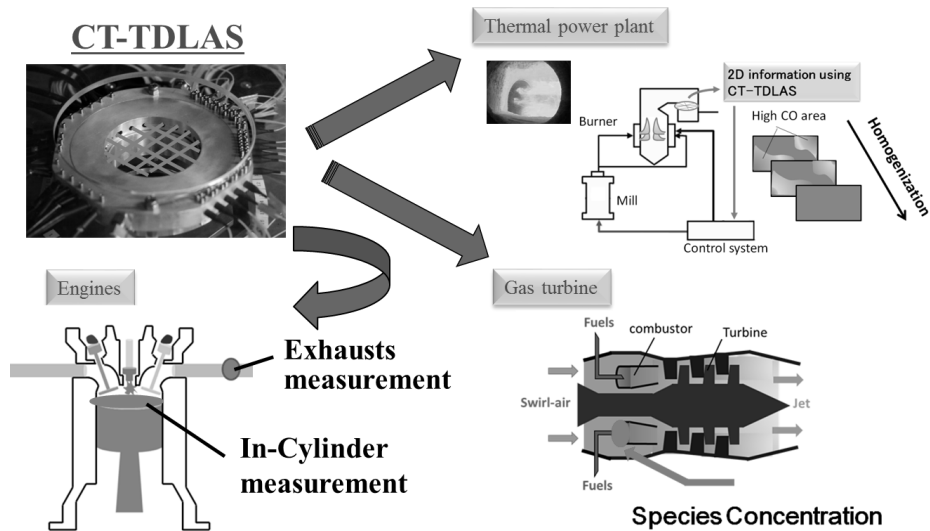


図 1.3.1 CT 利用半導体レーザー吸収法の産業機器への応用展開

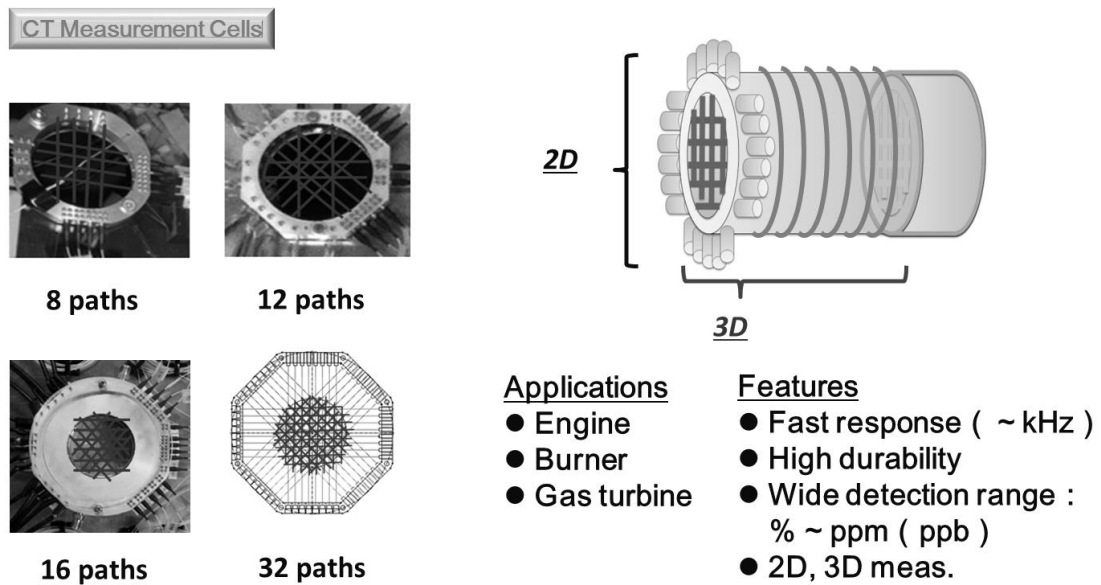


図 1.3.2 CT 利用半導体レーザー吸収法

第2章 理論

2.1 吸収法(Absorption SpeCTroscopy)

吸収法は気体分子が化学種に特有の波長の赤外線を吸収する性質及びその吸収量の温度・濃度依存性を利用した計測法であり，図 2.1-1 に示すように入射光が光路長の一様な吸収媒体を通過するとき，入射光と透過光の強度の比($I_\lambda/I_{\lambda 0}$)により濃度や温度を計測することができる．この関係は Lambert-Beer 則に従う^[1]：

$$I_\lambda / I_{\lambda 0} = \exp\{-A_\lambda\} = \exp\left\{-\sum_i \left(n_i L \sum_j S_{i,j}(T) G_{vi,j} \right)\right\} \quad (2-1)$$

ここで A_λ は吸光度， n_i は準位 i に存在する分子数密度， L は光路長， $S_{i,j}(T)$ は準位 i から j への遷移における吸収線強度， T は温度， $G_{vi,j}$ は吸収線のブロードニング関数であり，通常 Voigt 関数で表される．

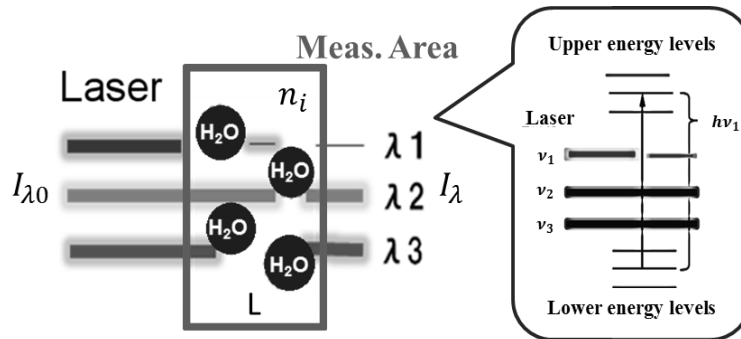


図 2.1-1 吸収法

(^[1] Deguchi, Y., Industrial applications of Laser Diagnostics, New York, CRS Press: Taylor & Francis 2011, pp.14.)

$S_{i,j}(T)$ はガスの種類，遷移波長とガス温度に依存し，次式で表される^[1]．

$$S_{i,j}(T) \approx S_{i,j}(T_0) \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \exp\left[-\frac{hcE_i''}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \left[\frac{1 - \exp(-\frac{hcv_{0,i}}{kT})}{1 - \exp(-\frac{hcv_{0,i}}{kT_0})} \right] \quad (2-2)$$

ここで， $S(T)$ と $S(T_0)$ はそれぞれ温度 T と参照温度 T_0 の線強度であり， $Q(T)$ は分配関数， h はプランク定数， c は光速， k はボルツマン定数， ν_0 は中心波数， E_i'' はその遷移における低エネルギー状態である．図 2.1-2 に HITRAN データベース^[77]をもとに得られる H_2O , CO , CO_2 , NO , CH_4 の線強度スペクトルを示す．1 本の線強度スペクトルは，ガスの温度，圧力，共存成分によるスペクトルのブロード

ニング(Broadening)現象により，そのスペクトル形状が変化する．したがって，実プロセスではそれらの環境変動を伴うため，その補正 (ブロードニング関数) が必要になる．

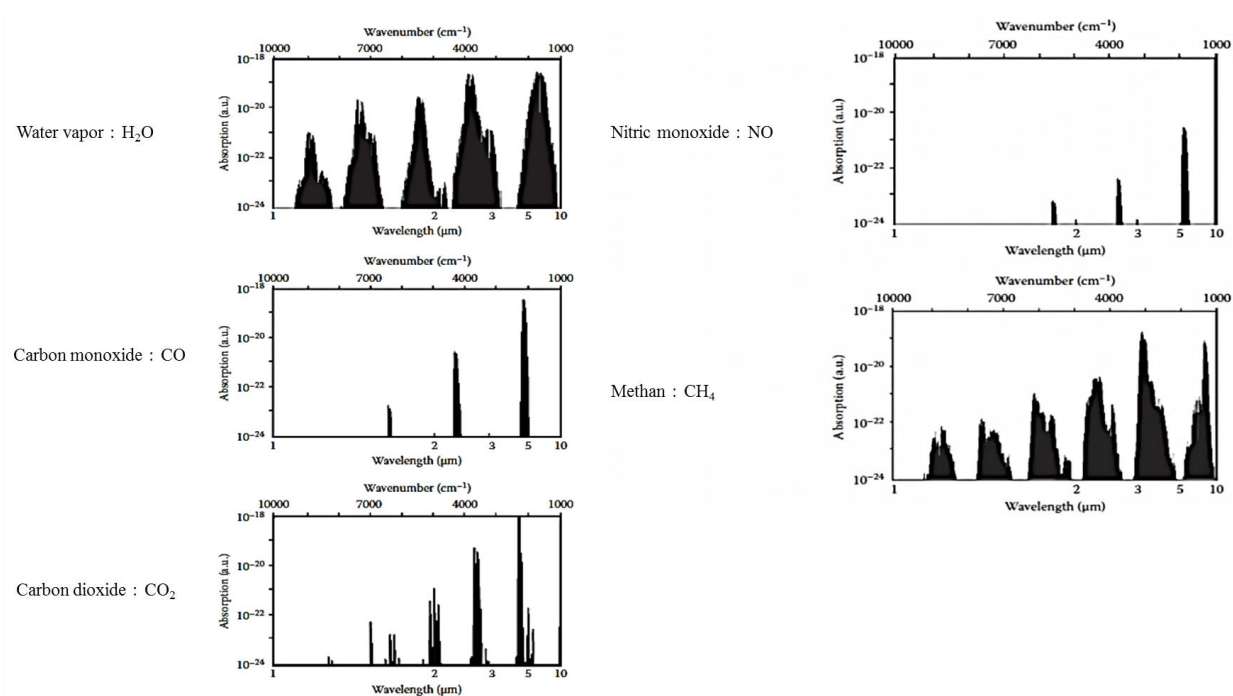


図 2.1-2 HITRAN データベース

(^[1] Deguchi, Y., Industrial applications of Laser Diagnostics, New York, CRS Press: Taylor & Francis 2011, pp.182-183.)

2.2 ブロードニング関数

実プロセスにおいて計測される吸収スペクトルは温度、圧力、ガス成分によるスペクトルのブロードニング現象により、そのスペクトル形状が変化する^[1]。ブロードニング現象は大きく分けて二つ、全ての分子に同様な影響を与えるもの(homogeneous broadening)とある分子のグループに異なった影響を与えるもの(inhomogeneous broadening)がある。前者は Natural broadening と Collisional broadening、後者は Doppler broadening からなり、実プロセスでは Natural broadening のスペクトルへの影響は小さく、Collisional broadening と Doppler broadening が支配的になる。図 2.2-1 にそれらのブロードニング形状を示す。したがって、計測された吸収スペクトルを定量的に評価する上で、それらの影響を考慮することは不可欠である。

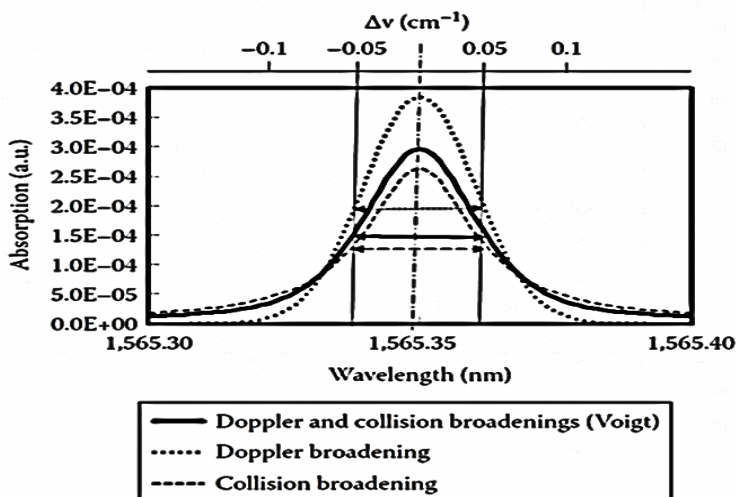


図 2.2-1 ブロードニング関数

(^[1] Deguchi, Y., Industrial applications of Laser Diagnostics, New York, CRS Press: Taylor & Francis 2011, pp.169.)

1) Natural broadening

Doppler broadening and Collision broadening は実プロセス(温度や圧力変動)において支配的となるが、Natural broadening は Heisenberg の不確定性原理によって、原子が励起状態に存在する時間が支配的となり、Natural broadening 形状は Lorentz 関数によって定義される。

$$G_N(\nu) = \frac{\Delta\nu_N}{2\pi} \frac{1}{(\nu - \nu_0)^2 + \left(\frac{\Delta\nu_N}{2}\right)^2} \quad (2-3)$$

ここで、 $\Delta\nu_N$ は Natural broadening の半値幅(FWHM: Full Width at Half Maximum)、 ν_0 :中心線周波数である。

2) Collisional broadening

Collisional broadening はある発光または吸収分子と他の分子との衝突によって起こる現象で、不確定性原理によって説明される。それらの同種あるいは異種化学種の分子同士の衝突の発生回数が多いほど、あるエネルギーレベルに存在する期間は短くなり、その遷移は広がる。その結果として、Collisional broadening 形状は Lorentz 関数によって定義される。

$$G_C(\nu) = \frac{\Delta\nu_C}{2\pi} \frac{1}{(\nu - \nu_0)^2 + \left(\frac{\Delta\nu_C}{2}\right)^2} \quad (2-4)$$

ここで、 $\Delta\nu_C$ は Collisional の半値幅、 ν_0 は中心線周波数である。異種化学種の分子同士の衝突において、二種成分内であれば Collisional 半値幅は一定温度における圧力に比例し、多種成分下では全半値幅は次式で定義される。

$$\Delta\nu_C = 2P\varepsilon = P \sum_i x_i (2\varepsilon_i) \quad (2-5)$$

$$\varepsilon_i(T) = \varepsilon_i(T_0) \left(\frac{T_0}{T}\right)^{n_i} \quad (2-6)$$

ここで、 ε_i は i 番目成分攪乱による Collisional broadening 係数、 T_0 基準温度、 n_i 温度依存係数である。また、Lorentz 関数のピーク高さは次式で表される。

$$G_C(\nu_0) = \frac{2}{\Delta\nu_C\pi} \quad (2-7)$$

3) Doppler broadening

Doppler broadening は吸収分子の不規則な熱運動により起こる現象で、その吸収分子の速度分散は平衡統計力学により導かれる Maxwell の式に従う。したがって、Doppler broadening の形状は Gaussian 関数によって定義される。

$$G_D(\nu) = \frac{c}{\nu_0} \sqrt{\frac{m}{2\pi kT}} \exp \left[-4 \ln 2 \cdot \frac{(\nu - \nu_0)^2}{\Delta\nu_D^2} \right] \quad (2-8)$$

$$\Delta\nu_D = \frac{2\nu_0}{c} \sqrt{\frac{2 \ln 2 \cdot kT}{m}} \quad (2-9)$$

ここで、 $\Delta\nu_D$ は Doppler の半値幅、 ν_0 は中心線周波数、 m は吸収化学種の分子量である。Doppler の半値幅は中心周波数とガス温度の平方根に比例し、吸収化学種の分子量に反比例する。ガス温度が大

きいほど Δv_D も大きくなり，ブロードニングの影響が強くなる．また，Lorentz 関数のピーク高さは次式で表される．

$$G_D(v_0) = \frac{2}{\Delta v_D} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \quad (2-10)$$

4) Combined Collisional and Doppler broadening

実プロセスでは Natural broadening, Collisional broadening と Doppler broadening が組み合わさった broadening 現象となる．Natural broadening のスペクトルへの影響は小さく，高温・低圧場では Doppler broadening，高圧場では Collisional broadening が支配的になる．Doppler broadening と Collisional broadening が互いに独立であれば，Combined Collisional and Doppler broadening は Voigt 関数に従う．

$$G_V(a, x) = \int_{-\infty}^{+\infty} G_D(u) G_C(V - u) du = G_D(v_0) \frac{a}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\exp(-y^2)}{a^2 + (x - y)^2} dy \quad (2-11)$$

ここで，パラメータ a 及び x と Voigt 幅 Δv_V は次式で表される．

$$a = \sqrt{\ln 2} \frac{\Delta v_C}{\Delta v_D} \quad (2-12)$$

$$x = \sqrt{\ln 2} \frac{(v - v_0)}{\Delta v_D} \quad (2-13)$$

$$\Delta v_V = \frac{\Delta v_C}{2} + \sqrt{\left(\frac{\Delta v_C^2}{4} + \Delta v_D^2\right)} \quad (2-14)$$

また，Lorentz 関数のピーク高さは次式で表される．

$$G_V(v_0) = \left[\left(\frac{\beta}{\gamma_{ED} \sqrt{\pi}} \right) + \left(\frac{1 - \beta}{\pi \gamma_C} \right) \right] \quad (2-15)$$

ここで， γ_D と γ_C は Collisional と Doppler の半値幅の半分幅 HWHM(Half-Width at Half Maximum line widths)は次式で表される．

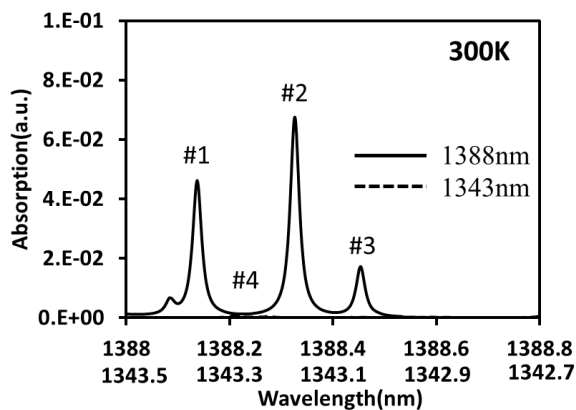
$$\beta = \left(\frac{\gamma_{ED}}{\gamma_C + \gamma_{ED}} \right) \quad (2-16)$$

$$\gamma_{ED} = \frac{\gamma_D}{\sqrt{\ln 2}} \quad (2-17)$$

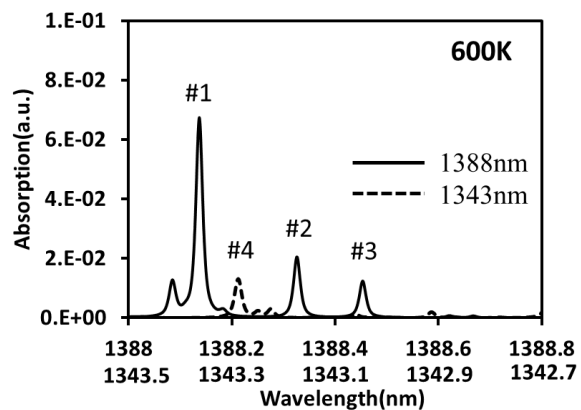
2.3 吸収スペクトルと温度・濃度計測

2.3.1 水蒸気吸収スペクトル温度依存性

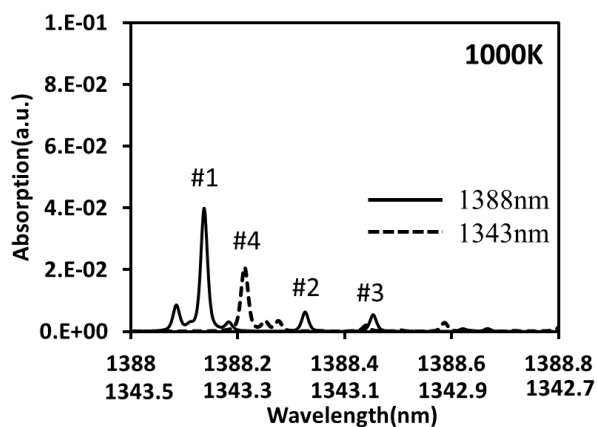
図 2.3.1-1 に 1388nm 域及び 1343nm 域の水蒸気吸収スペクトル温度依存性を示す．計算には HITRAN データベースを用いた^[77]．吸収線強度は温度と濃度に依存し，スペクトル形状変化から温度・濃度を算出することが可能となる．吸収線の強度比は温度に依存し，吸収スペクトルから二つの吸収線を選定し，それらの吸収線の強度比を求めることで温度を再構築できる．1000K 程度までは 1388nm 域の吸収スペクトルを用いて温度算出が可能であるが，1000K を超えると#2 及び#3 の吸収線の温度変化に対する吸収量変化が小さくなり評価が難しくなる．そこで，新たに 1000K 以上で顕著な吸収が現れる 1343nm 域の吸収スペクトルを用いることで，2000K までの温度計測が可能となる．



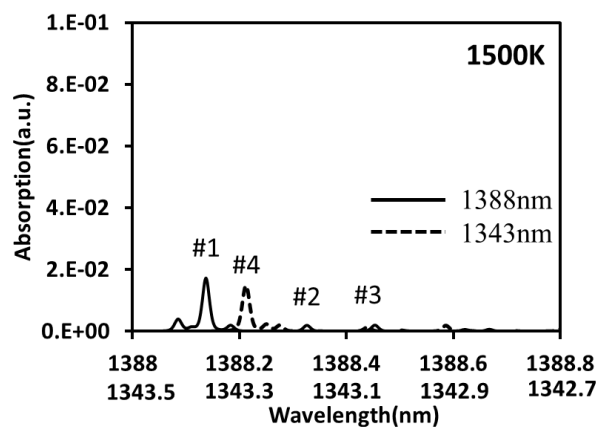
(a) 300K, 0.1MPa



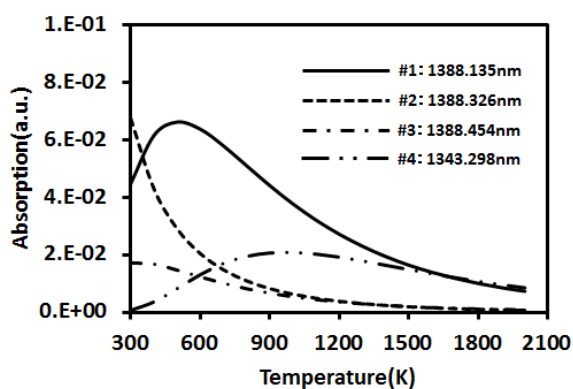
(b) 600K, 0.1MPa



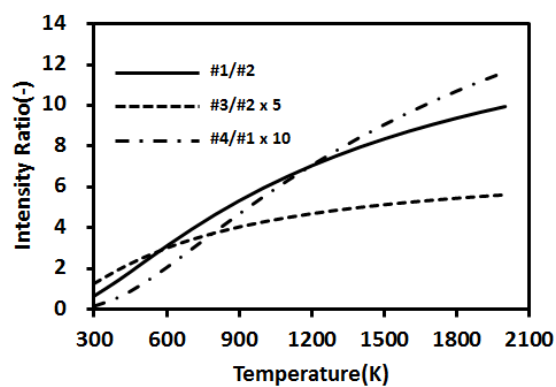
(c) 1000K, 0.1MPa



(d) 1500K, 0.1MPa



(e) Temperature dependence of four absorption lines of two absorption lines

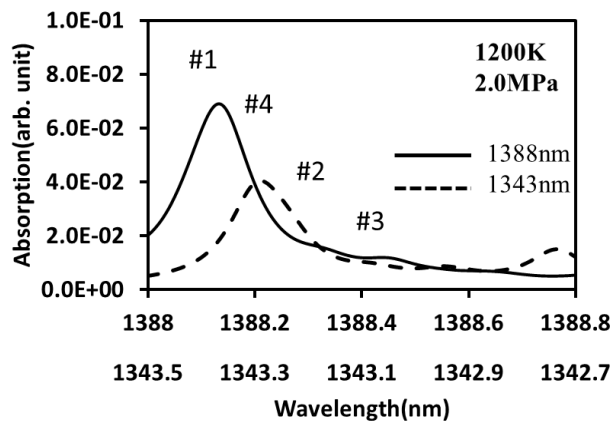


(f) Temperature dependence of intensity ratio

図 2.3.1-1 1300 域水蒸気吸収スペクトル温度依存性(HITRAN データベース)

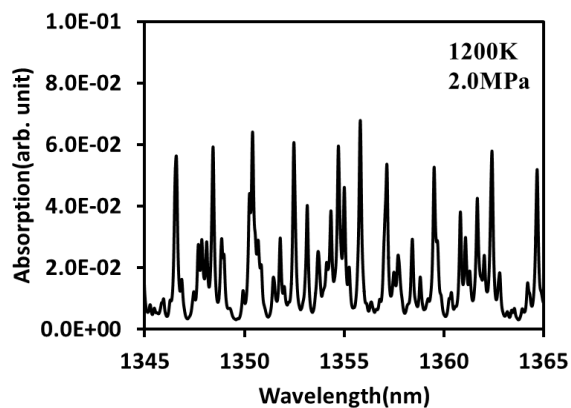
2.3.2 ブロードニングと圧カシフト

図 2.3.2-1 に圧力増加による水蒸気吸収スペクトルのブロードニング及び圧カシフトを示す。高圧下では吸収線の広がりにより吸収線の重なりが生じるため、温度を算出する上で広い波長範囲の吸収スペクトルを計測する必要が生じる。また、圧力が高くなっていくと吸収スペクトルが長波長側へシフトする現象が起こる。したがって、計測された吸収スペクトルを定量的に評価する上で、それらの影響を考慮することは不可欠である。



(a) 1200K, 2.0MPa

(#1:1388.135nm, #2:1388.326nm, #3:1388.454nm, #4:1343.298nm)



(b) 1200K, 2.0MPa

図 2.3.2-1 1300 域水蒸気吸収スペクトル圧力依存性(HITRAN データベース)

2.3.3 メタン吸収スペクトル

図 2.3.3-1 に 1600nm 域の温度：1000K，圧力：1MPa までのメタン吸収スペクトルを示す．計算には HITRAN データベースを用いた．1635nm における吸収スペクトルは温度変化に対する吸収量変化が小さく，複数の吸収線が存在し，かつ他化学種と重なりが生じない波長帯であり，メタン濃度計測に適している．

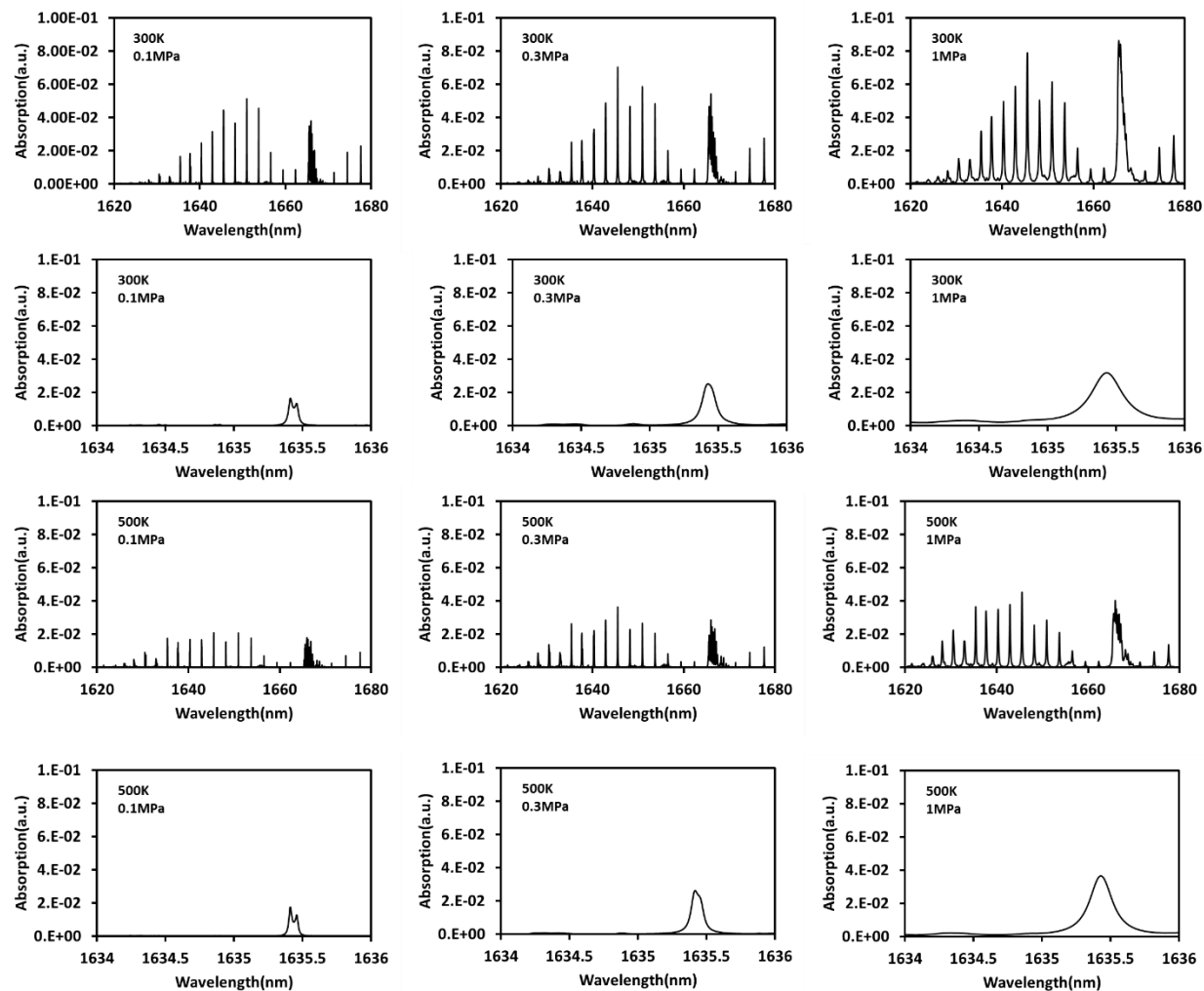


図 2.3.3-1 メタン吸収スペクトル

2.4 半導体レーザ吸収法(Diode Laser Absorption SpeCTroscopy)

2.4.1 半導体レーザ吸収法

図 2.4.1-1 及び図 2.4.1-2 に半導体レーザ吸収法の概要を示す。半導体レーザは活性層の温度により発振波長が変化する特性を持つ。この特性を利用すると、半導体レーザ に入力する電流値を変化させ、活性層の温度を制御して波長スキャンを行い、波長に対する吸収量の変化(吸収スペクトル)を連続的に計測できる(波長可変半導体レーザ吸収法=TDLAS : Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy)。計測状態量としては温度、%～ppm(ppb)レベルの濃度(CO, CH₄, NO, O₂)、圧力、速度、速度がある。LD と変調器を用いて、波長をスキャンさせたレーザを発振させ、ファイバーを用いて計測場に照射させる。そして、その透過光を受光器で検知し、透過光強度シグナルをコンピュータに取り込む。

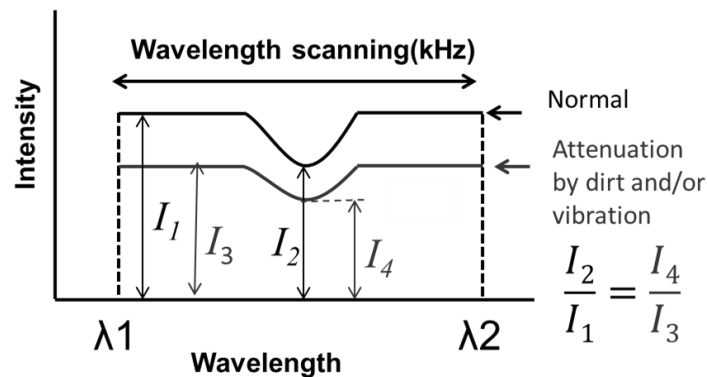


図 2.4.1-1 半導体レーザ吸収法

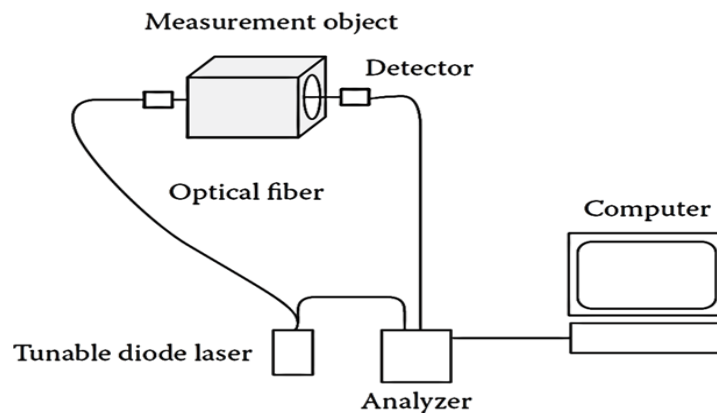


図 2.4.1-2 半導体レーザ吸収法システム

(^[1] Deguchi, Y., Industrial applications of Laser Diagnostics, New York, CRS Press: Taylor & Francis 2011, pp.14.)

2.4.2 計測データとスペクトルフィッティング

図 2.4.2-1 に TDLAS で得られる典型的な計測シグナルを示す。TDLAS では LD に入力する電流を変化させることでレーザ発振波長をスキャンさせ、数十 kHz 以上の周波数で波長に対する吸収量の変化を連続的に計測できる。図 2.4.2-1 に示す計測された透過光強度シグナル I からリファレンス I_0 を予測して吸収量を求める。図 2.4.2-2 に示すような吸収スペクトルを得ることができる。その吸収量データから温度や濃度を算出することができる。

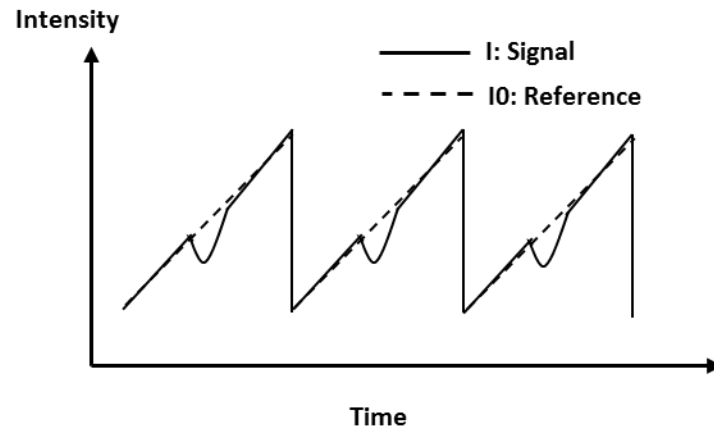


図 2.4.2-1 TDLAS で得られる典型的な計測シグナル

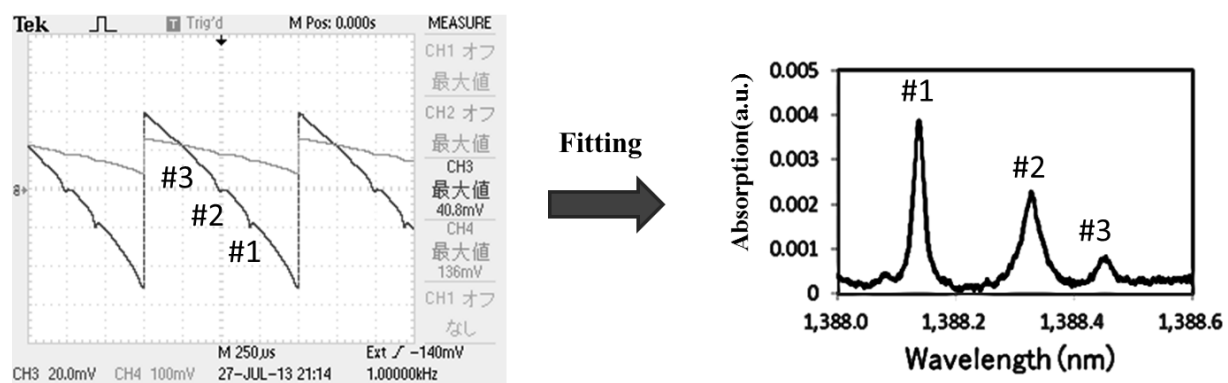
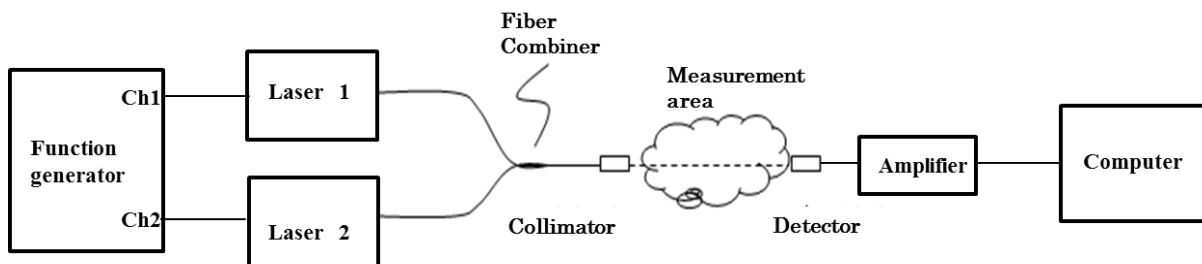


図 2.4.2-2 スペクトルフィッティング

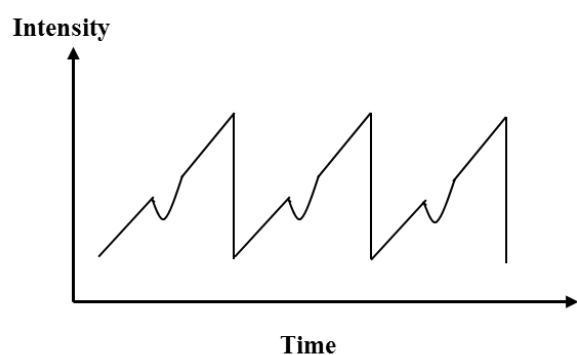
2.4.3 計測感度向上と多種成分同時計測技術

半導体レーザー吸収法では、計測感度向上のため、波長変調による二次微分を評価する方法や、レファレンス信号との差分を取る方法などが用いられている。しかしながら、それらの技術は、定量化や装置が複雑化する問題があり、実用化を阻害する要因となっていた。そこで、2つの異なった波長の光を混ぜて、波長を変化させるうえでのレーザー光強度の変化を微小とし、信号強度を増幅することで、装置の簡略化と定量化、高感度化、多種成分同時計測を達成する。

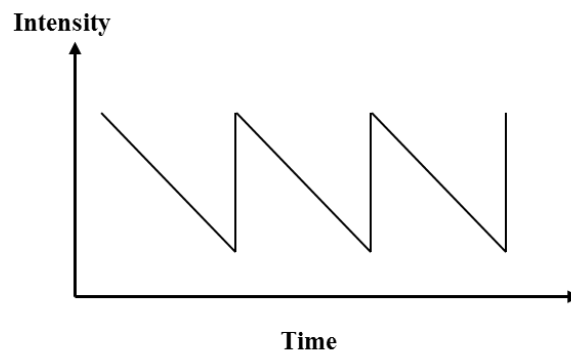
図 2.4.3-1 に本技術の構成図を示す。計測対象ガス成分が吸収する波長を含む波長帯のレーザー光と吸収しないあるいは他ガス成分を吸収する波長を含む波長帯のレーザー光を発光させ、発光された二つのレーザー光は光コンバイナに導光され、分岐比 50:50 で混合される。その際、図 2.4.3-1 (b),(c)に示すように、波長を変化させる上でレーザー 1 とレーザー 2 のレーザー光強度の変化を真逆にし、二つのレーザー光を混合させことで、図 2.4.3-1 (d)示すようにレーザー光強度の変化を微小とし、信号強度を増幅することが可能となる。そして、その混合光をコリメータで計測場に照射させると、ガス中を透過している間に特定の波長のレーザー光がガス中に含まれている対象ガス成分によって吸収された後、受光器で受光される。対象ガス成分による吸収の情報を持つ受光された光は受光器で電気信号に変換され、その電気信号はデジタル信号に変換されて計測受光強度信号として解析装置に入力される。計測された受光強度信号では対象ガス成分による吸収が顕著に表れる。一つのレーザー光を用いて行う方法では吸収量が計測受光強度信号に対して 10^{-3} レベル程度までしか評価できないが、本技術で得られる計測信号は 10^{-5} レベル程度まで評価でき、従来法の波長変調による二次微分を評価する方法や、レファレンス信号との差分を取る方法と同程度である。さらに計測対象ガス成分と異なるガス成分を吸収する波長を含む波長帯のレーザー光を用いることで、複数のガス成分の同時計測も可能となる。



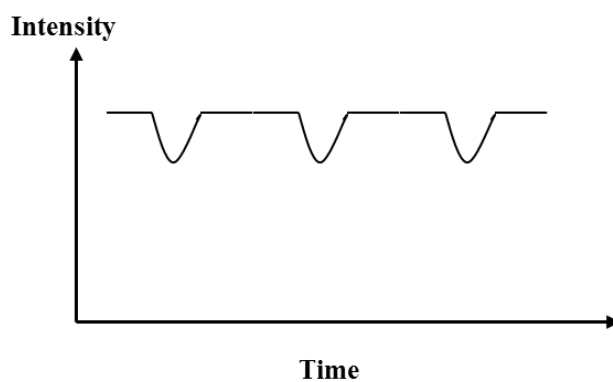
(a) システム



(b) レーザ 1



(c) レーザ 2



(d) レーザ 1+レーザ 2

図 2.4.3-1 計測感度向上と多種成分同時計測技術原理

(レーザ光を用いたガス分析装置及びガス分析方法，特願 2013-171366，出願日 2013 年 8 月 21 日，特開 2015-040747 (P2015-040747A)，公開日 2015 年 2 月 26 日，出口祥啓，神本崇博)

2.5 CT 半導体レーザ吸収法(CT-TDLAS)

半導体レーザ光吸収法はレーザ光が通過したすべての吸収媒体に強く影響を受けるため、解析手法として空間分布再構成手法である CT 法を用いた。一般的によく知られている X 線 CT は X 線を利用して対象物をスキャンしてその断面内を細分化し、X 線吸収量をその切り分けた要素ごとに計測し、未知数と同じ数の X 線吸収量の情報を集めることで対象物断面を構成する技術である。一方、燃焼ガスには水蒸気や炭酸ガス等が多く含まれていて、照射された光は固有の吸収スペクトルをもつそれらの化学種を通過するときにある波長で一部吸収されて減衰する。その波長に対する吸収量の変化を連続的に計測することで、燃焼ガスの温度や化学種濃度を決定できる。これが可変波長半導体レーザ吸収法(Tunable Diode Laser SpeCTroscopy)の特長である。吸収法では、計測場を透過する光路の積分値として吸収量が計測される。2次元温度分布を計測するためには、図 2.5-1 に示すように複数のレーザ光を計測場に照射し、CT を用いることで 2次元画像を再構成することが可能となる^[78-100]。図 2.5-2 に示す構成でレーザ光を計測場に照射した場合、各レーザパスにおける信号強度は以下の関係式で表わされる。

$$A_{\lambda,p} = \sum_q n_q L_{p,q} \alpha_{\lambda,q} \quad (2-18)$$

ここで $A_{\lambda,q}$ はパス p における吸光度、 n_q はグリッド q における分子数密度、 $L_{p,q}$ はグリッド q を通る p 方向のパス長である。図 2.5-3 に計算の手順を示す。計算では、初期の温度、水蒸気濃度を仮定し、式(3)を用いて繰り返し計算を行うことにより、実験値と理論値の誤差が最小となるよう、各グリッドにおける温度、濃度を収束させた。

$$Error = \sum \left\{ (A_{\lambda,q})_{theory} - (A_{\lambda,q})_{experiment} \right\}^2 \quad (2-19)$$

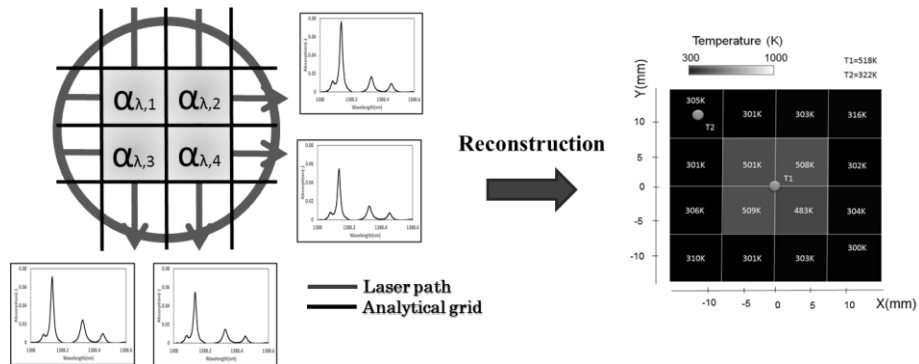


図 2.5-1 CT 半導体レーザ吸収法

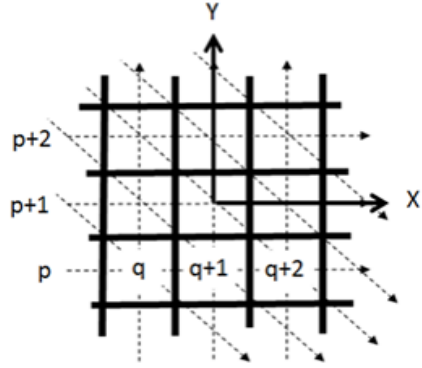


図 2.5-2 CT 解析

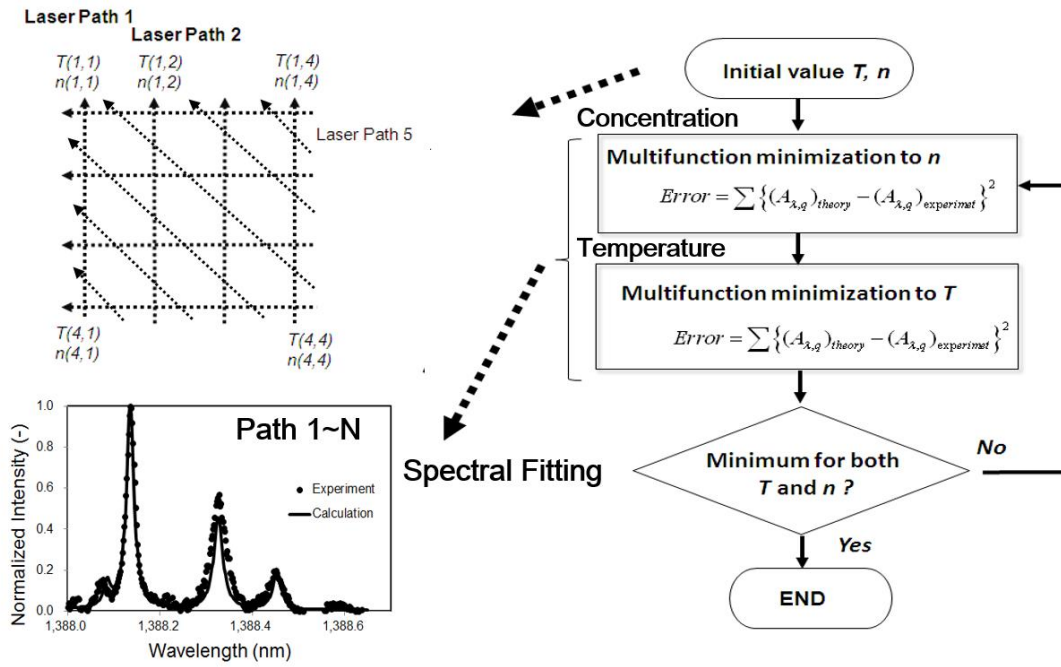


図 2.5-3 CT-アルゴリズム.

第3章 実験内容

3.1 温度計測基礎データベース構築

CT 半導体レーザ吸収法による2次元温度測定にはデータベースの充実が必要である。エンジンなどの燃焼器を対象とした場合の目標データベース領域を図3.1-1に示す。高圧かつ高温の条件に関しては、以下の温度・濃度領域の結果から理論予測を行いデータベースとすることが有効である。

- ① 計測対象：温度
- ② 温度範囲：300-2000K
- ③ 圧力範囲：0.1(温度：300-2000K)
0.2-5MPa(温度：300-800K)
- ④ 使用装置：0.1MPa 一次元バーナ
0.2-5MPa 校正用セル，燃焼器
- ⑤ 比較対象：熱電対(輻射補正あり)
- ⑥ 使用レーザ：0.1-0.5MPa⇒1388nmDFB レーザ+1343nmDFB レーザ
0.6-5.0MPa⇒外部共振型半導体レーザ

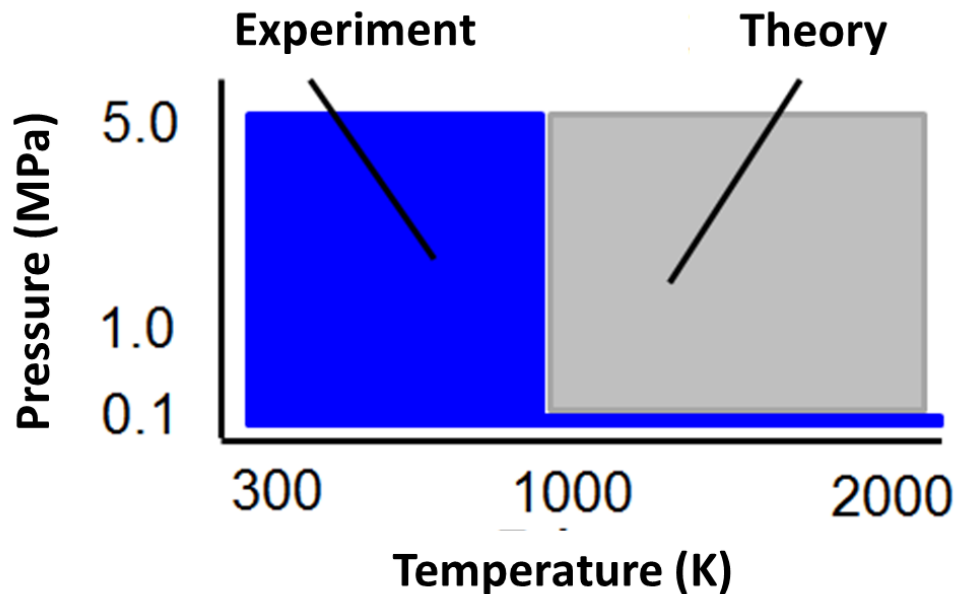


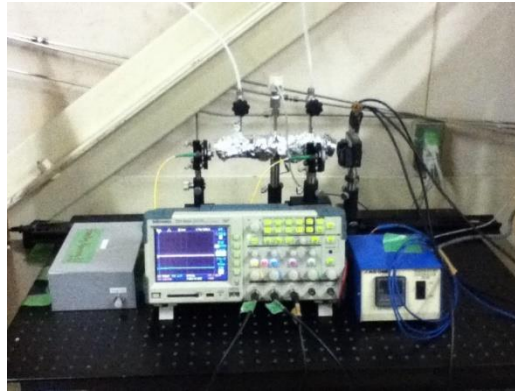
図 3.1-1 データベース構築領域

3.1.1 圧力校正用セル試験

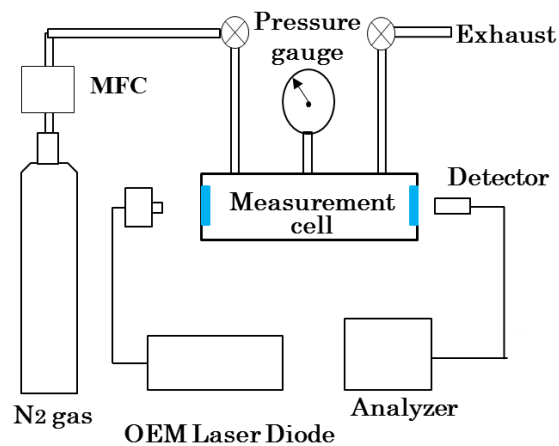
1) 低圧セル(0.1-0.9MPa)

実験装置の概略を図 3.1.1-1 に示す。N₂ ガスと水蒸気を計測セルに導入し、圧力を 0.1～0.9MPa の条件にて、水蒸気スペクトルを計測し、データベースの構築を行う。計測には、スキャン周波数 30kHz、波長走査範囲 30nm 以上の外部共振器タイプ波長可変レーザ(Santec 株式会社製 HSL-200-30-TD) を用いる。

- ① 使用装置：圧力校正用セル(図 3.1.1-1 参照)
- ② 使用ガス：水蒸気，N₂
- ③ 評価項目：高圧場水蒸気スペクトルデータベース構築
- ④ 圧力範囲：0.1MPa-0.9MPa
- ⑤ 温度範囲：300K
- ⑥ 使用レーザ：外部共振型半導体レーザ



(a) 写真



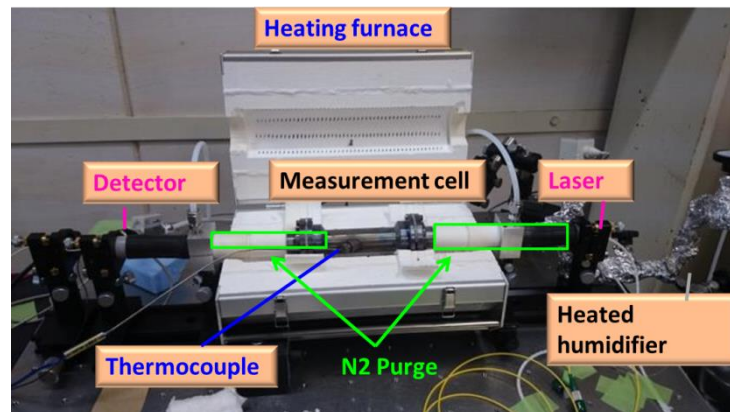
(b) 概略

図 3.1.1-1 圧力校正用セル試験概略

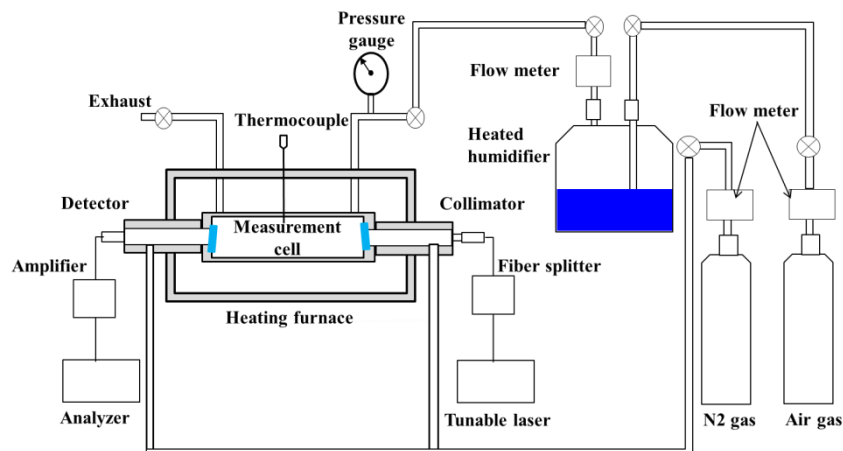
2)高温・高圧セル(300-800K, 0.2-5MPa)

高温・高圧場では、高温・高圧場用の計測セルの活用が有効となる。実験装置の概略を図 3.1.1-2 に示す。N₂ ガスと水蒸気を計測セルに導入し、セル内温度を 300～800K、圧力を 0.2～5MPa の条件にて、水蒸気スペクトルを計測し、データベースの構築を行う。計測には、走査範囲 0.6nm の 1388nm 域と 1343nm 域 DFB レーザ、スキャン周波数 30kHz、波長走査範囲 30nm 以上の外部共振器タイプ波長可変レーザ(Santec 株式会社製 HSL-200-30-TD, 図 3.1.2-4), DFB 型及び外部共振型の 2 種類のレーザを用いた。

- ① 使用装置：高温・高圧セル(図 3.1.1-2 参照)
- ② 使用ガス：水蒸気, N₂
- ③ 評価項目：高圧場水蒸気スペクトルデータベース構築
- ④ 圧力範囲：0.2-5MPa
- ⑤ 温度範囲：300-800K
- ⑥ 使用レーザ：1388nmDFB レーザ+1343nmDFB レーザ, 外部共振型半導体レーザ



(a) 写真



(b) 概略

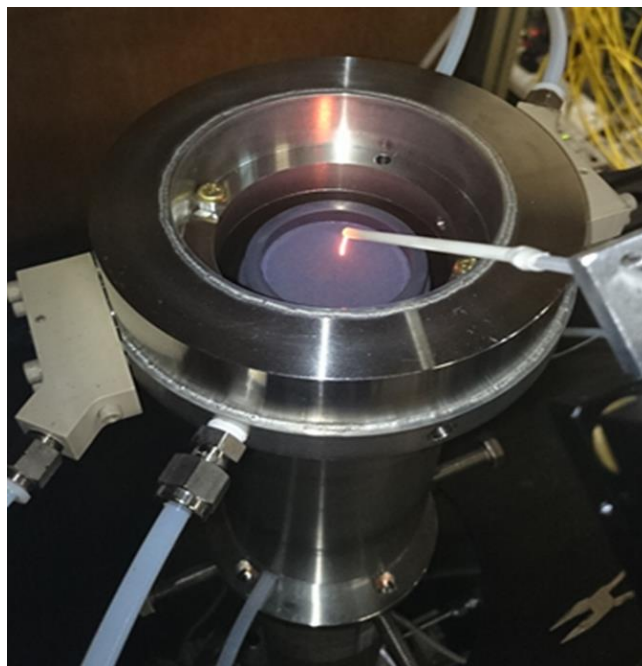
図 3.1.1-2 高温・高圧セル試験概略

3.1.2 一次元バーナ試験

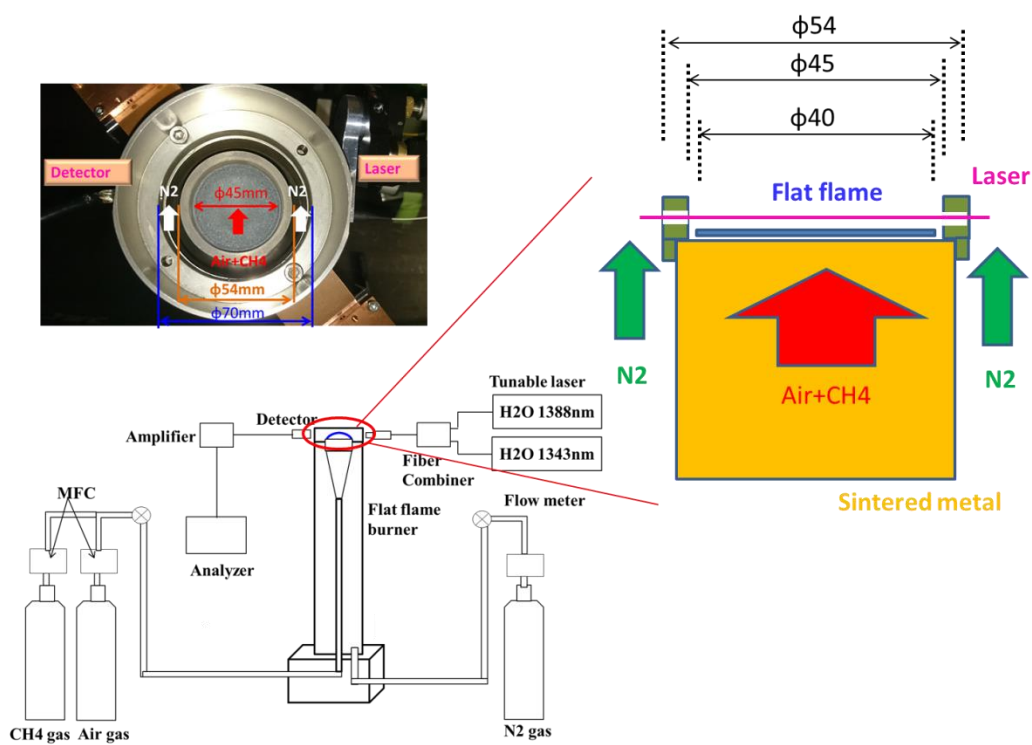
高温域温度計測特性評価に用いたフラットフレームバーナ実験装置の概略を図 3.1.2-1 に示す。水蒸気吸収スペクトルを計測するために、1388nm で走査範囲 0.6nm の DFB レーザ(NTT エレクトロニクス社 NLK1E5GAAA) を使用した。また、1000K 程度までは 1388nm 域の吸収スペクトルを用いて温度算出が可能であるが、1000K を超えると図 2.3.1-1 に示す#2 及び#3 の吸収線の温度変化に対する吸収量変化が小さくなり評価が難しくなる。そこで、新たに 1000K 以上で顕著な吸収が現れる 1343nm で走査範囲 0.6nm の DFB レーザ(NTT エレクトロニクス社 NLK1S5GAAA)を使用した。レーザのスキャン周波数は 5kHz で、1388nm と 1343nm 二つのレーザ光は光コンバイナに導光されて混合される。2 つの異なった波長の光を混ぜて、波長を変化させるうえでのレーザ光強度の変化を微小とし、信号強度を増幅することで、装置の簡略化と定量化、高感度化、多種成分同時計測を達成する。

また、大気圧程度では 1388nm 域および 1343nm 域の吸収スペクトルを用いて温度算出が可能であるが、図 2.3.2-1(a)に示すように圧力上昇に伴い、ブロードニング効果により吸収線の重なりが生じ評価が難しくなる。そこで、高圧下において水蒸気の吸収スペクトルを計測するために、図 3.1.2-4 に示すレーザのスキャン周波数は 30kHz で、1330nm～1370nm を波長掃引可能な外部共振器型半導体レーザ(Santec 社 HSL -200-30-TD)を使用した。DFB 型及び外部共振型の 2 種類のレーザを用いて、図 3.1.2-1 に示す実験装置を用いて水蒸気の吸収スペクトルを計測し、高温域における温度計測の特性評価を行った。レーザ光はコリメータ(THORLABS, 50-1310-APC)でフラットフレームバーナ上に照射される。透過光はフォトダイオード(浜松フォトニクス, G8370-01)によって検知され、吸収スペクトルデータを記録計(日置電気, メモリハイコーダ MR8741)に取り込んだ。また、熱電対(B 型線径 100 μ m, アンベエスエムティ)で光路上の温度を 2mm 間隔で計測した。熱電対による温度計測に際し、今回の研究では輻射の影響は補正せず、比較を行った。一次元バーナ径は 45mm であり、メタンと空気の当量比を 0.95 で一定とし、流量を各々 $1.6 \times 10^{-5} \sim 2.7 \times 10^{-5}$ (m³/s, ntp), $16 \times 10^{-5} \sim 27 \times 10^{-5}$ (m³/s, ntp) に設定して、さらにフラットフレーム上部にステンレスメッシュを設置して測定部での火炎温度を可変させた。また、フラットフレームの周囲流として 33×10^{-5} (m³/s, ntp) の窒素を流した。計測領域の水蒸気絶対濃度は当量比より算出でき、本濃度値を使用し、両端部の温度勾配を考慮してスペクトルデータを補正する。バーナ両端部の周囲窒素との混合が発生しないような構造としている。

- ① 使用装置：図 3.1.2-1 参照
- ② 使用ガス：A i r +メタン, N₂
- ③ 評価項目：高温場データベース構築(比較対象：熱電対)
- ④ 圧力範囲：0.1MPa
- ⑤ 温度範囲：1100K～2000K
- ⑥ 使用レーザ：1388nmDFB レーザ+1343nmDFB レーザ, 外部共振型半導体レーザ



(a) 写真



(b) 一次元バーナ概略

図 3.1.2-1 一次元バーナ

3.2 濃度計測基礎データベース構築

3.2.1 メタン計測特性評価

1)メタン検出精度確認

- ① 使用装置：図 3.2.1-1 参照
- ② 使用ガス：窒素+メタン
- ③ 評価項目：計測の線形性，検出限界
(1秒，S/N=1，常温でのメタン濃度値，絶対吸収量)

実験装置の概略を図 3.2.1-1 に示す．メタンガスと窒素ガスを計測セルに導入し，メタン濃度を 0～1%の範囲で変化させ，1635nm で走査範囲 0.6nm の DFB レーザ(NTT エレクトロニクス社 NLK1U5FAAA)でメタン吸収スペクトルを計測し，メタン検出精度の確認を行った．

2)吸収スペクトルの圧力依存性取得

実験装置の概略を図 3.2.1-1 に示す．メタンガスと窒素ガスを計測セルに導入し，圧力を 0.1～0.9MPa 及び 0.1Mpa \pm 8kPa の範囲で変化させ，1635nm で走査範囲 0.6nm の DFB レーザ(NTT エレクトロニクス社 NLK1U5FAAA)でメタン吸収スペクトルを計測し，0.1～0.9MPa 及び -8～+8kPa の範囲の吸収スペクトルを取得し，圧力補正の可能性を確認する．

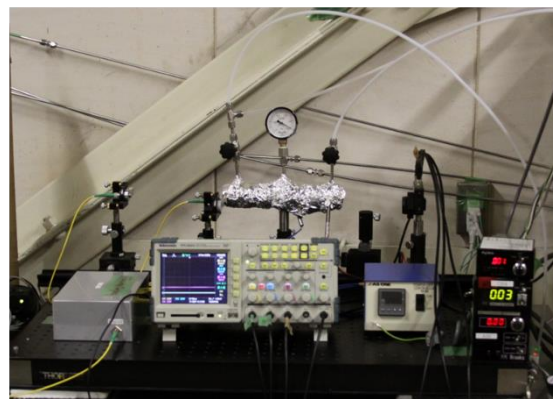
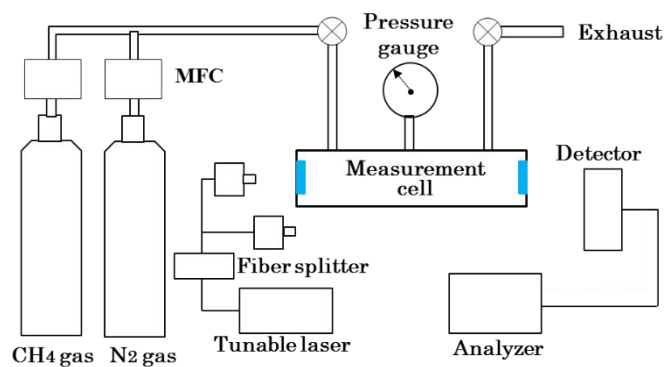


図 3.2.1-1 メタン検出感度確認及び線幅パラメータ評価試験光学系

3.2.2 アンモニア計測特性評価

1) アンモニア検出精度確認

- ① 使用装置：図 3.2.2-1 参照
- ② 使用ガス：窒素+アンモニア
- ③ 評価項目：計測の線形性，検出限界
(1 秒，S/N=1，常温でのメタン濃度値，絶対吸収量)

実験装置の概略を図 3.2.2-1 に示す．この実験は，尿素 SCR の計測ニーズである高濃度域と，アンモニアスリップの計測ニーズである低濃度域での NH_3 濃度による吸収量の変化を確認する． NH_3 ガスは，200ppm と 2% の濃度である標準ガス(NH_3+N_2)を使用して確認を行った．実験方法としては， N_2 ガスで濃度を調整した NH_3 標準ガスを計測セル(長さ：220mm)に導入し，計測セル内にレーザを通過させた透過光と通過させていないレーザ光を差分増幅フォトディテクタ(THORLABS, PDB210C)で検出し，オシロスコープ(Tektronix, TPS 2024)により吸収量を測定した．

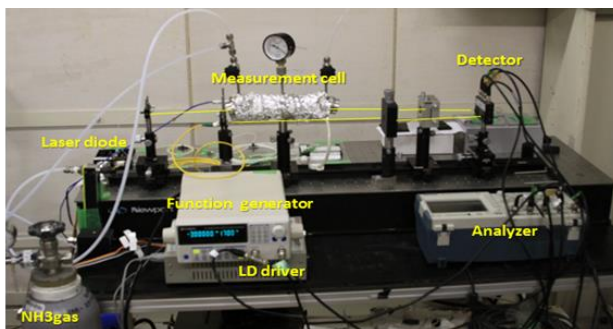
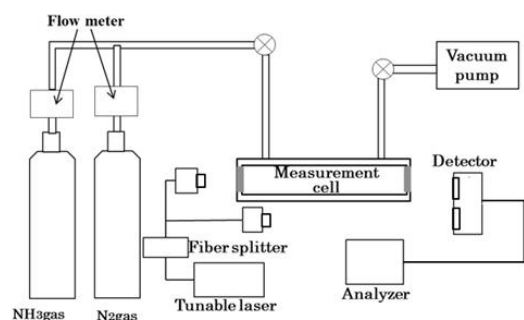


図 3.2.2-1 アンモニア検出感度確認試験光学系

2) 実ガスでの計測特性評価

実験装置の概略を図 3.2.2-2 および図 3.2.2-2 に示す．この実験は，エンジン(富士重工業，EX13)を用いて，熱を持つ排ガス内での計測特性を確認する． NH_3 標準ガスは 200ppm の濃度を使用し，排ガス内でも ppm レベルの計測が可能かを確認した．実験方法としては NH_3 検出感度確認とほぼ同様の装置・方法で， N_2 ガスに替わり排ガス流量により NH_3 濃度を調整し，計測セルに導入する．排ガス流量は，真空ポンプ(アルバック機工，DA-241S)の吸引流量により調節した．今回，排ガス吸引管から計測セルにかけてヒーターを巻きつけ 60°C に温めて計測を行い，吸引排ガスに熱を加えた．また，回転速度計(日置電気，タコハイテスタ FT3406)でエンジンの回転数を 1200～1300rpm(アイドリング)の間で行った．

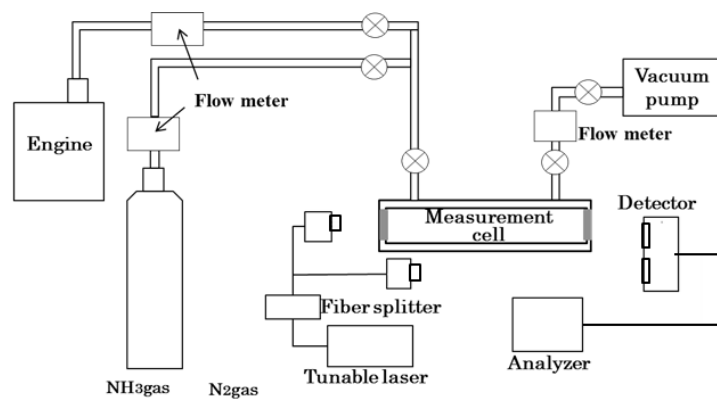
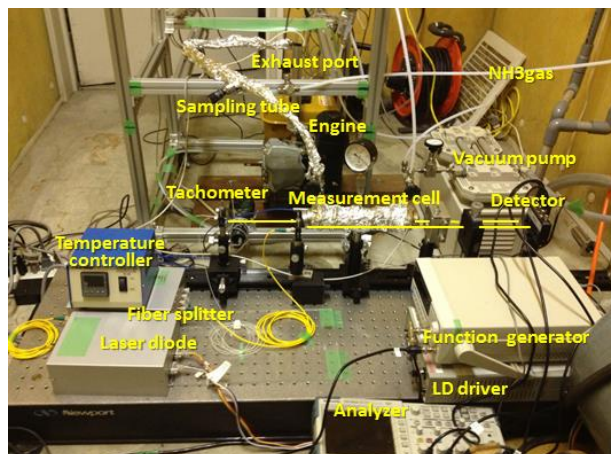


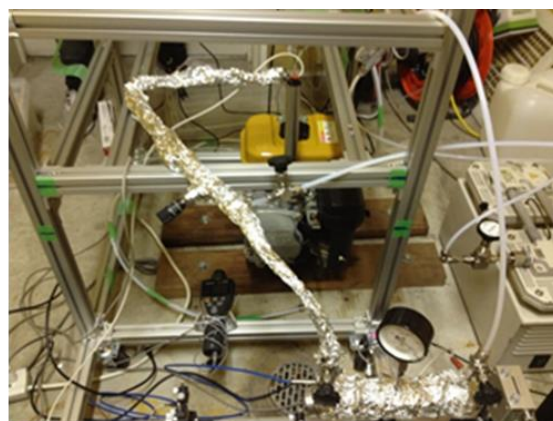
図 3.2.2-2 実ガスでのアンモニア計測特性評価試験



(a) 全体



(b) サンプルング



(c) 計測セル

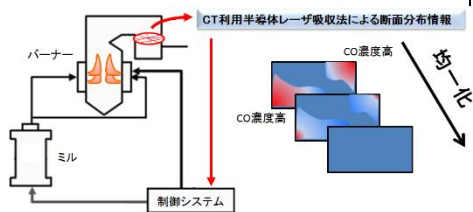
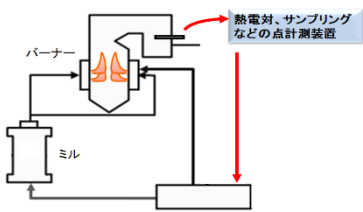
図 3.2.2-3 写真(実ガスでのアンモニア計測特性評価試験)

3.3 CT-半導体レーザー吸収法を用いた 2 次元温度・濃度分布計測装置開発

3.3.1 16 パス計測セル

エンジン等のガスの挙動を捉えるため、半導体レーザー吸収法に CT(Computed Tomography)を組合せ、各レーザーパスの光吸収量から CT を用いて温度・濃度を算出する方法を開発し、燃焼ガスにおいて kHz レベルの 2 次元リアルタイム温度・濃度計測を目的とする。

表 3.3.1-1 CT 半導体レーザー吸収法と従来法の比較

	本技術	従来法
装置構成	 <p>燃焼機器内部の 2 次元断面分布をリアルタイムに計測</p>	 <p>燃焼機器内部の 1 点を計測</p>
応答性	1s 以下	数十秒
ガス種	同一原理にて温度(300-2000K)、複数成分濃度(CH ₄ , CO, CO ₂ , NH ₃ , O ₂ : ppm~%)を同時計測可能	計測ガス種毎に計測装置を用意
計測点	50 点以上(同時計測)	1 点(位置を変化させて分布形成)
ニーズ	火力発電プラント：ボイラ，ガスタービンなどの温度，濃度管理，制御 自動車産業：排ガス管理，燃焼制御 化学プラント：プロセスモニタ・制御 各種産業機器：工程プロセス管理，制御に活用	

3.3.2 32 パス計測セル

空間分解能はレーザパス数に依存し，CT 解析対象内で温度分布が存在する場合，低温部温度に加重された平均温度となる．図 3.3.2-1 に示す 16 パス，32 パス計測セルを用いてブンゼンバーナ(CH₄ 噴射器)で温度(濃度)分布計測を行い，パス数を増加させることにより，空間分解能特性を把握・改善することが有効である．

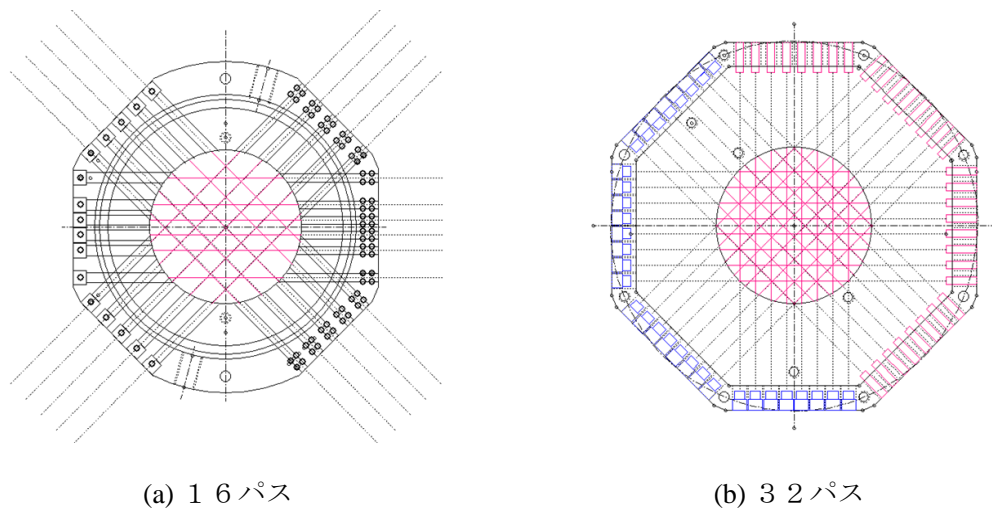


図 3.3.2-1 16・32パス計測セル

3.3.3 高圧場適用可能な CT 計測セルプロトタイプ

定容燃焼器に導入可能な CT 計測セルの製作を行った。現在の計測セルはレーザ光路にレンズ等を設置していない。そのため、計測場が高圧の場合は計測対象がセル側に流入してしまうため計測ができない。新たな CT 計測セルでは石英円環ガラスを内側に設けることで計測場を乱すことなく計測を可能にした。高圧場適用可能な CT 計測セルプロトタイプ概要を図 3.3.3-1 に示す。また、石英円環ガラス写真を図 3.3.3-2 に示す。CT 計測セルは上下に分離しており、石英円環ガラスと計測セルに O リングを設置することで計測場の気密を保った。各レーザ光路は石英円環ガラスの屈折を考慮して設計を行った。

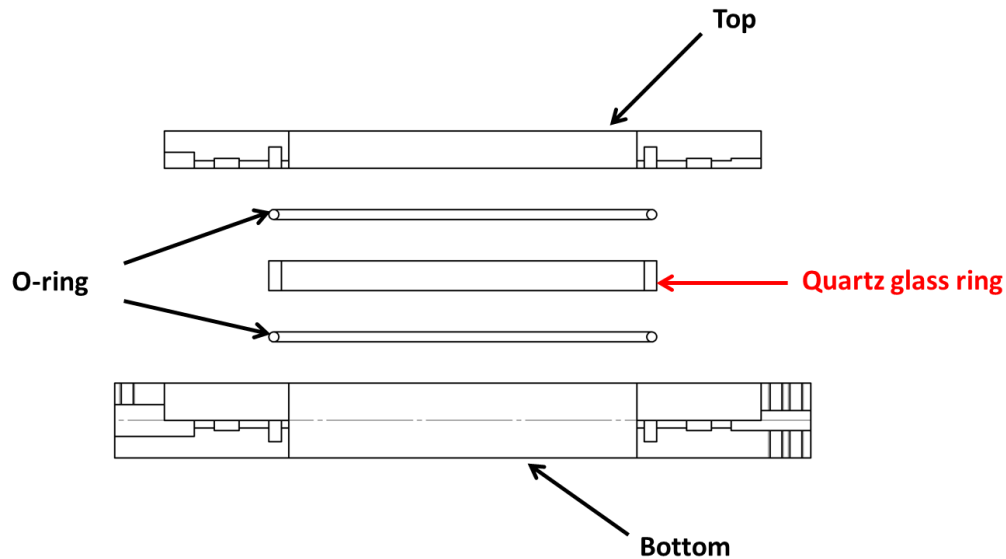


図 3.3.3-1 高圧場適用可能な CT 計測セルプロトタイプ

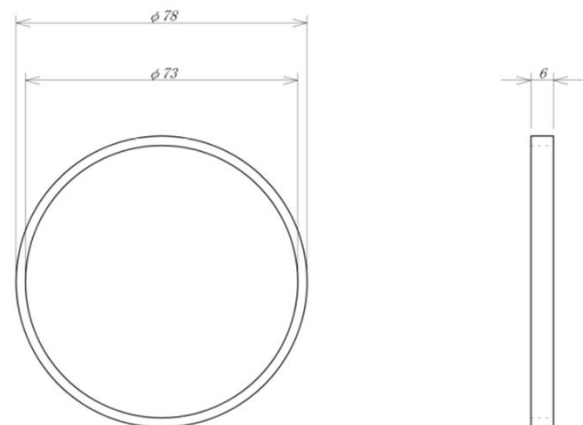


図 3.3.3-2 石英円環ガラス

3.4 2次元温度分布計測特性評価

3.4.1 ブンゼンバーナ火炎温度計測

- ① 使用装置：ブンゼンバーナ及び CT 計測セル(図 3.4.1-1 参照)
- ② 使用ガス：メタン及び空気
- ③ 評価項目：2次元温度計測特性(熱電対との比較)

実験装置の概略を図 3.4.1-1 に示す。ブンゼンバーナは二重管構造になっており、内側の噴射ノズル(内径 8mm)からはメタンと空気、外側の管(内径 65mm)には空気が流れる。CT 法及び熱電対でバーナ火炎上の温度分布計測を行い、両者の結果を比較し CT 法の精度検証を行う。噴射ノズルとレーザとの距離は 95mm である。

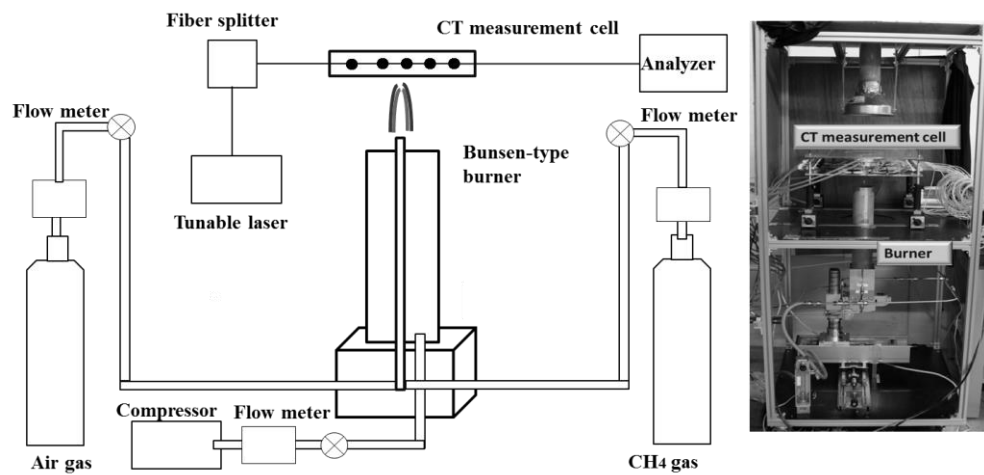


図 3.4.1-1 ブンゼンバーナ火炎温度計測

3.4.2 微粉炭バーナ温度計測

- ① 使用装置：微粉炭バーナ及び CT 計測セル(図 3.4.2-1 参照)
- ② 使用ガス：メタン，微粉炭，空気
- ③ 評価項目：2 次元温度時系列計測特性

実験装置の概略を図 3.4.2-1 に示す。ブンゼン型バーナを用いたメタン-空気および微粉炭火炎において、CT 計測セルを使用した 2 次元温度分布計測を実施した。微粉炭バーナは二重管構造になっており、内側の噴射ノズル(内径 8 [mm])からは微粉炭(0.85 g/min)と空気が、外側の円環(内径 65 [mm])からはメタンが噴流する。フィーダー(日清エンジニアリング(株), Freecon μ M type)の上部から空気を導入し、微粉炭を連続的に接続流路へ供給した。微粉炭は接続流路を介して、イジェクタ(FK フクハラ, M-05)により負圧で火炎内部に導入され、微粉炭火炎を構築する。この際、周囲空気を導入して、火炎形状を一様にした。吸収スペクトルを計測するために、半導体レーザ(NTT エレクトロニクス社, LK1E5GAAA / NLK1B5EAAA)を用いた。吸収スペクトルを低温域で確認可能な 1388 [nm]の波長、及び高温域で確認可能な 1343 [nm]の波長を用いた。CT 計測セルはバーナ先端から、54 [mm]の高さに設置され、ファイバーコンバイナで合波されたレーザ光が、スプリッタで 16 分岐され、コリメータ(THORLABS, 50-1310-APC)により火炎に照射される。透過光は 16 個フォトダイオード(浜松フォトニクス, G8370-01)によって検出され、1 スキャン当たり 400 点の吸収スペクトルのデータを記録計(日置電機, メモリハイコード MR8740)に取り込んだ。各パスの水蒸気吸収スペクトルデータに CT を適用して、温度分布画像を再構成した。

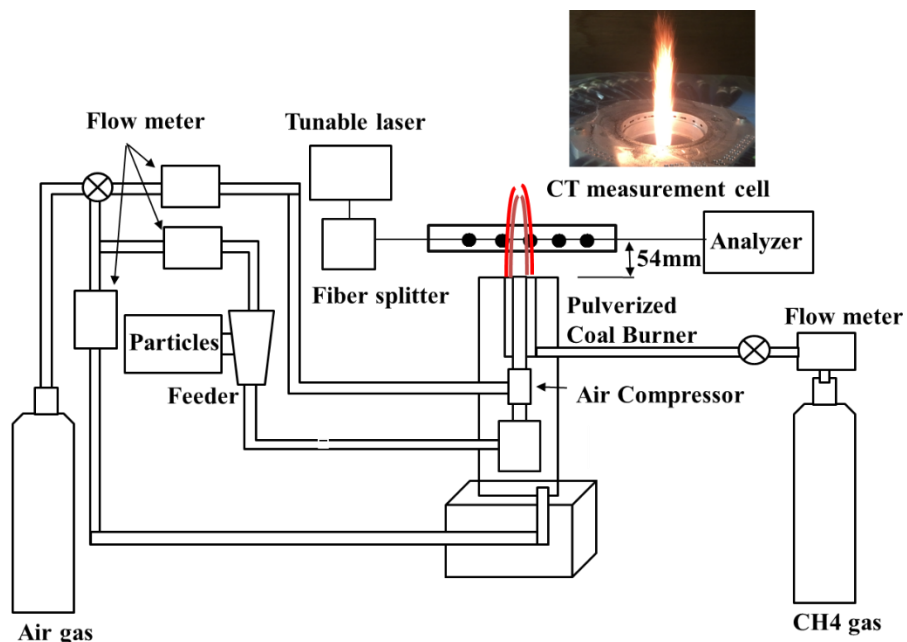


図 3.4.2-1 微粉炭バーナにおける 2 次元温度時系列計測特性試験

3.4.3 エンジン排気ガス温度計測

図 3.4.3-1 にエンジン実験装置の概略を示す。エンジン排気ポート 5mm 上方にレーザが位置するように CT 計測セルを配置した。エンジンの排管は内径 22mm である。計測セルの径は 70mm であり、その中心に排管を設置した。実験では、CT 計測エンジン始動時より 5 秒間の吸収量データを記録計に取り込んだ。また熱電対で排管中心温度を、回転速度計(日置電気, タコハイテスタ FT3406)でエンジンの回転数を計測した。CT 法及び熱電対でエンジン排気管ガスの温度分布計測を行い、両者の結果の比較を行った。

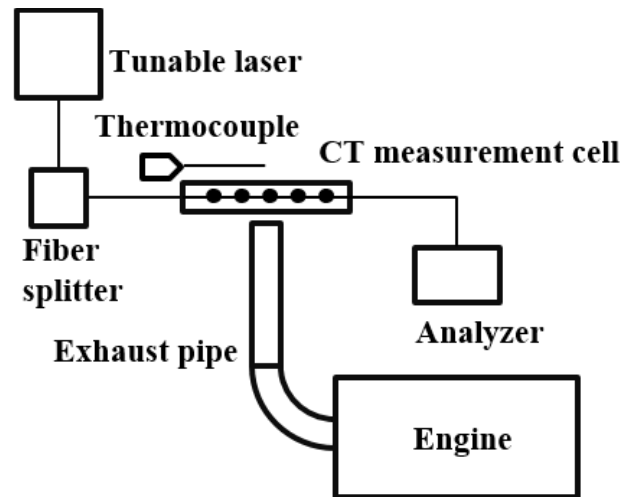


図 3.4.3-1 エンジン排気ガス温度計測試験

3.4.4 高温・高圧域における2次元温度分布計測の特性評価

高温・高圧域における2次元温度分布計測の特性評価試験に用いた実験装置の概略を図3.4.4-1に示す。定容燃焼器にCT計測セルを設置した。燃料にはメタンと空気の混合気を使用し、初期圧を大気圧、当量比を1とし、点火プラグを放電させて燃料ガスに点火し、燃料ガスの火炎伝播により燃焼室内圧力を上昇させた。その際の燃焼器内の2次元温度分布をDFB型及び外部共振型の2種類のレーザを用いてCT計測セルで計測することで、CT半導体レーザ吸収法の高温・高圧域における2次元温度分布計測の特性評価を行った。水蒸気の吸収スペクトルを計測するために、レーザのスキャン周波数は5kHzで、1388nmで走査範囲0.6nmのDFBレーザ(NTTエレクトロニクス社 NLK1E5GAAA)及び1343nmで走査範囲0.6nmのDFBレーザ(NTTエレクトロニクス社 NLK1S5GAAA)を使用した。また、高圧下において水蒸気の吸収スペクトルを計測するために、レーザのスキャン周波数は30kHzで、1330nm～1370nmを波長掃引可能な外部共振器型半導体レーザ(Santec社 HSL-200-30-TD)を使用した。レーザ光はファイバスプリッタにより分岐され、コリメータ(THORLABS, 50-1310-APC)で対象物に照射される。透過光はフォトダイオード(浜松フォトニクス, G8370-01)によって検知され、2000kHz(DFBレーザ)及び20000kHz(外部共振器型半導体レーザ)、1スキャンあたり400～700点の吸収スペクトルデータを記録計(日置電気, メモリハイコーダ 8861)に取り込んだ。各パスの吸収スペクトルは、図2.5.3に示すCTアルゴリズムに使用され、温度及び水蒸気濃が求められる。

- ① 使用装置：火炎伝播を模擬した燃焼器
- ② 使用ガス：Air+メタン
- ③ 評価項目：高温・高圧場分布計測特性
- ④ 圧力範囲：1MPa～4MPa
- ⑤ 温度範囲：300K～2000K
- ⑥ 使用レーザ：1388nmDFBレーザ+1343nmDFBレーザ
外部共振型半導体レーザ

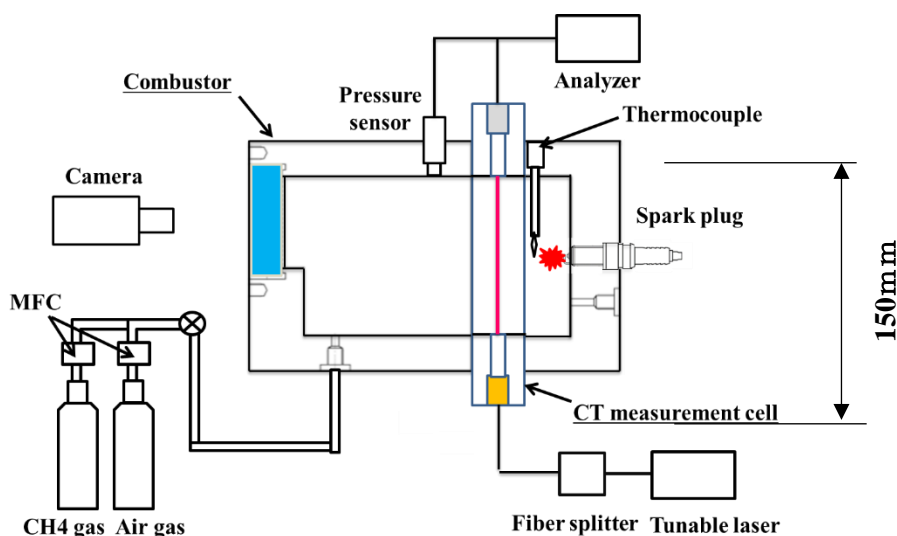


図 3.4.4-1 高温・高圧域における2次元温度分布計測の特性評価試験

3.5.2 2次元メタン分布の非定常計測

- ④ 使用装置：DDV バルブ，ブンゼンバーナ，CT 計測セル
⑤ 使用ガス：メタン(平均 0.54L/min)及び空気(3.6L/min)
⑥ 評価項目：DDV バルブ周波数(10,20,50,100,200,300Hz)

実験装置の概略を図 3.5.2-1 に示す。ブンゼンバーナは二重管構造になっており、内側の噴射ノズル(内径 8mm)からはメタン(平均 0.54L/min)と空気(3.6L/min)、外側の管(内径 65mm)には空気(20L/min)のみを流した。DDV バルブを用いてメタン流量を変動させ、CT 計測セルで火炎直前のメタン分布の非定常計測を行った。噴射ノズルと DDV バルブとの距離は 255mm で、メタンは噴射ノズルより 80mm 上流で空気と混合させ、整流後(メタン流量を変動による火炎の変動を観察するため)に噴射させた。噴射ノズルとレーザとの距離は 3mm で、CT 計測セル上部の金網(噴射位置より 15mm 上方)で火炎を形成させた。

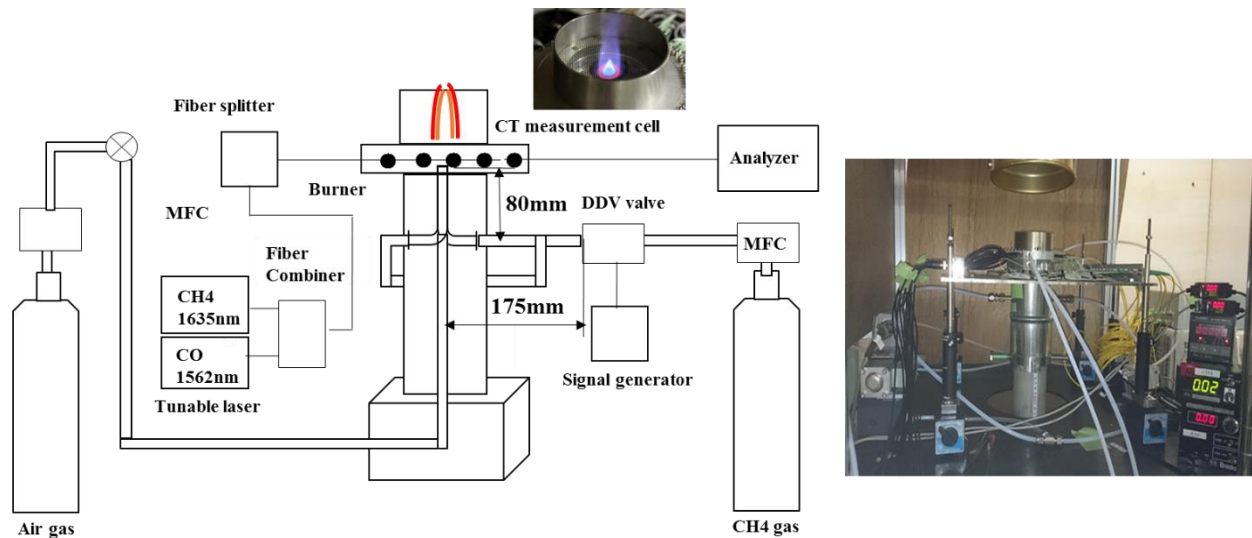


図 3.5.2-1 2次元メタン分布の非定常計測

3.5.3 エンジン排ガス内での 2 次元 NH₃ 計測

図 3.5.3-1 に実験装置の概略図及び装置写真を示す。実験で用いたエンジン(富士重工業, EX13)の排気管は内径 40mm, 長さ 160mm で, その中心に位置する NH₃ 噴射管は内径 8mm である。一方, 計測セルの径は 70mm であり, その中心且つレーザ発射口と NH₃ 噴射口の距離が 10mm の位置に計測セルを設置した。実験では, エンジンをアイドリング状態(1200~1300rpm)に保ち, 排ガス及び NH₃ ガス(2%)を噴射させ計測を行った。

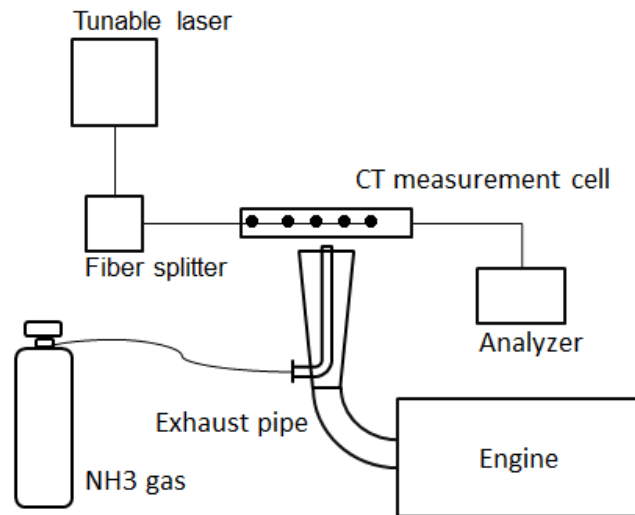


図 3.5.3-1 エンジン排ガス内での 2 次元 NH₃ 計測

3.6 開発用燃焼炉を用いた微粉炭燃焼場における 2 次元温度分布計測

- ① 使用装置：モデリング炉，32パス CT 計測セル
- ② 使用ガス：燃料(気体，微粉炭)及び空気
- ③ 使用レーザ：1388nmDFB レーザ，1343mDFB レーザ
- ④ 評価項目：2次元温度時系列計測特性

実験装置の概略を図 3.6-1，図 3.6-2 に示す．内径 250mm，長さ 2300mm の円筒縦置炉である．微粉炭バーナは同軸 3 重管バーナを使用している．供給する空気は，バーナ中心から順に 1 次空気，2 次空気，および 3 次空気と定義し，それぞれ石炭搬送，1 次空気配管と高温の 3 次空気配管の伝熱を防ぐシール空気，および主燃焼用空気として使用している．バーナ配管の内径は，それぞれ 5.7 mm，44.6 mm，52.5 mm である．また，パンチングを通した空気を，周囲流として供給している．保炎用メタンバーナは東京ガス・エンジニアリング製 UPB-40D を使用している．32 パス CT 計測セルは外径 $\phi 660.4\text{mm}$ ，内径 $\phi 250\text{mm}$ ，厚さは 35mm，それを燃焼炉のスペーサ間に厚さの合計が 110mm になるように挟み込む．このセルは，炉の組み替えによって任意の高さで計測が可能であり，微粉炭バーナ先端から 595 mm の位置を計測した．その際，温度分布の変化を捉えるため，石炭供給量を変更した実験を行った．

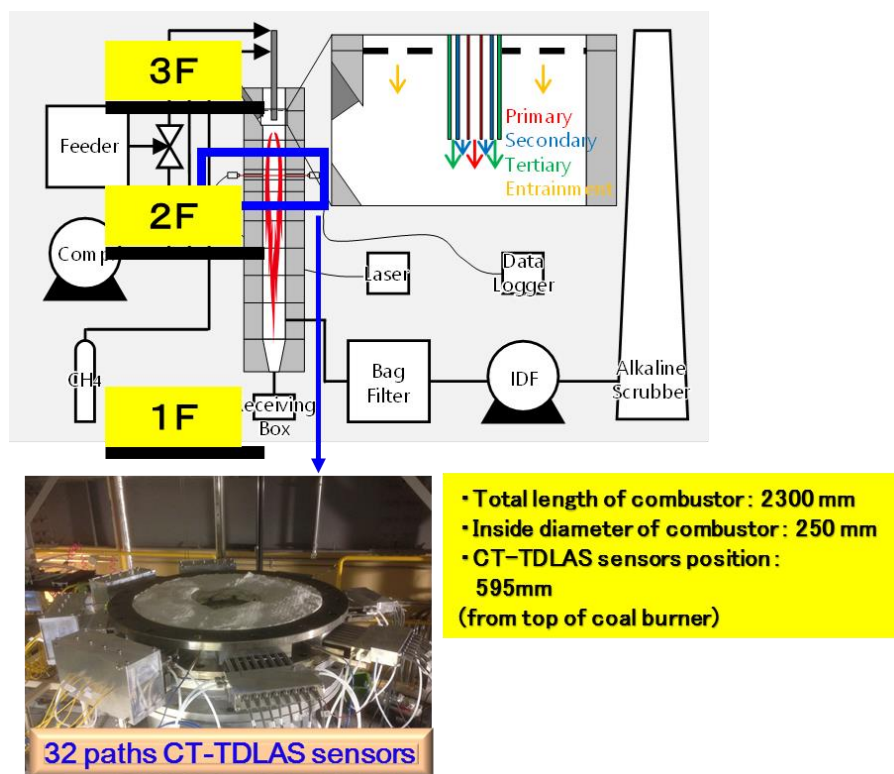
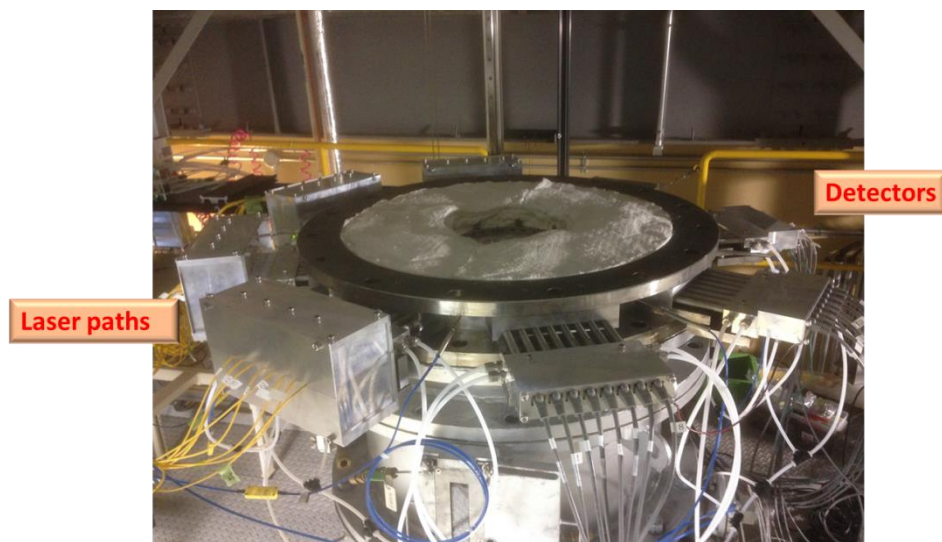
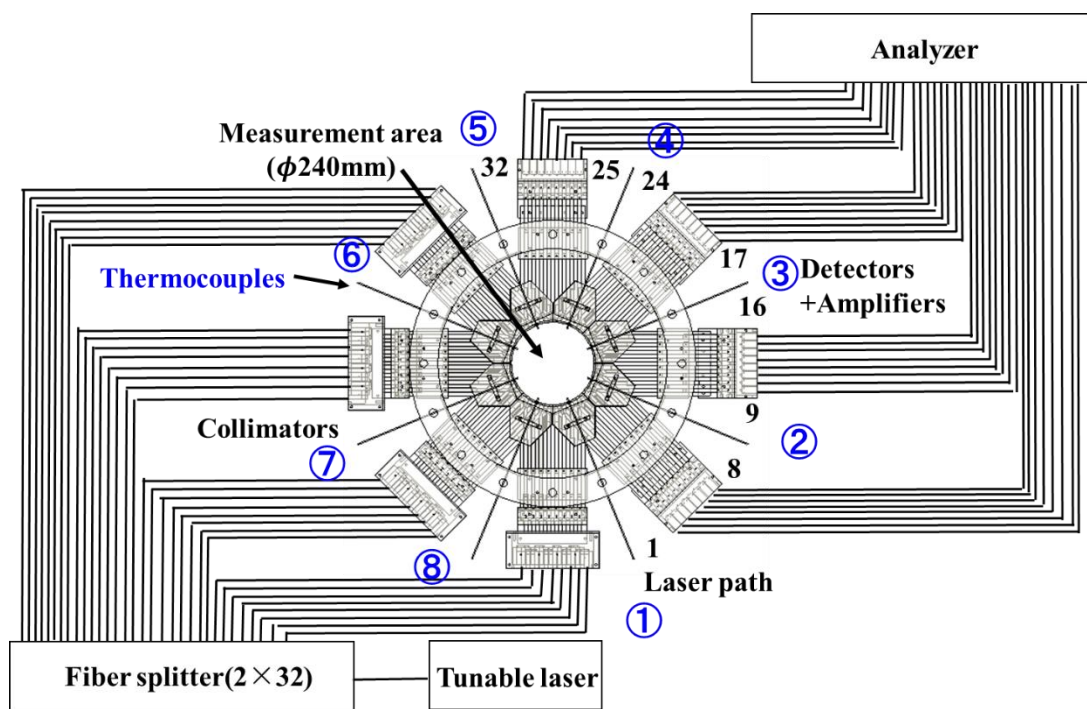


図 3.6-1 炉内温度計測システム概要



(a) 写真



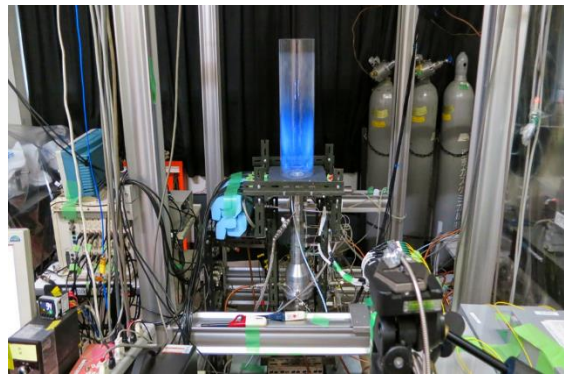
(b) 概要

図 3.6-2 32パス温度計測システム

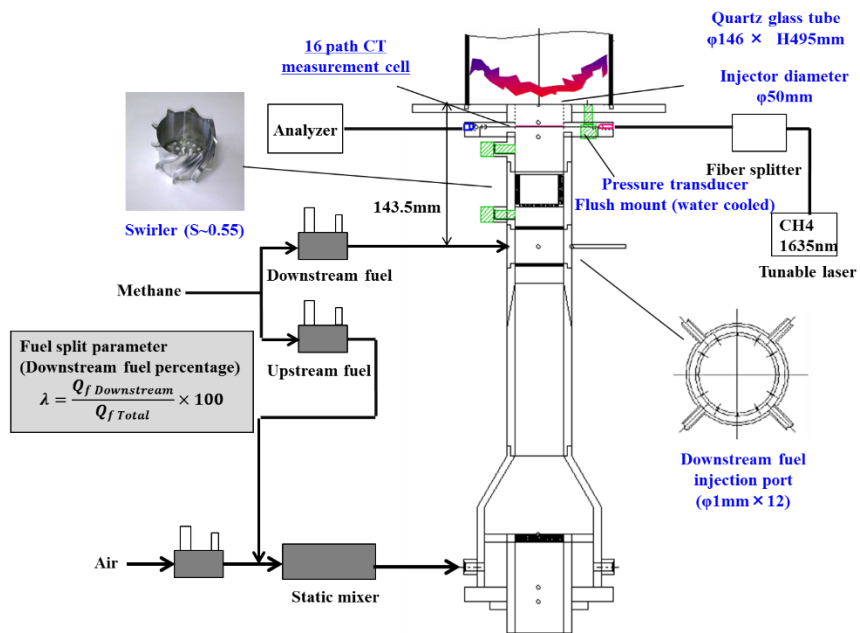
3.7 ガスタービン燃焼器モデルを用いた2次元メタン分布計測

- ① 使用装置：ガスタービン燃焼器モデル，2次元メタン分布計測装置
- ② 使用ガス：メタン及び空気
- ③ 評価項目：高速バルブによる強制振動及び燃焼振動時に2次元メタン濃度計測特性

図 3.7-1 に示すガスタービン燃焼器モデル^[101]において，図 3.7-2 に示す kHz レベルで 2 次元濃度分布計測可能な CT 半導体レーザ計測セルを設置し，高速バルブによる強制振動及び自励燃焼振動時における火炎直前の 2 次元メタン分布を時系列計測し，火炎直前のメタン濃度特性を把握する．



(a)写真



(b)システム概要

図 3.7-1 ガスタービン燃焼器モデルを用いた2次元メタン分布計測

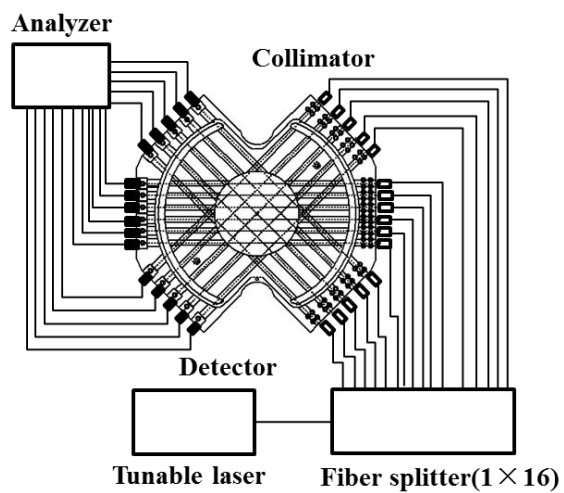
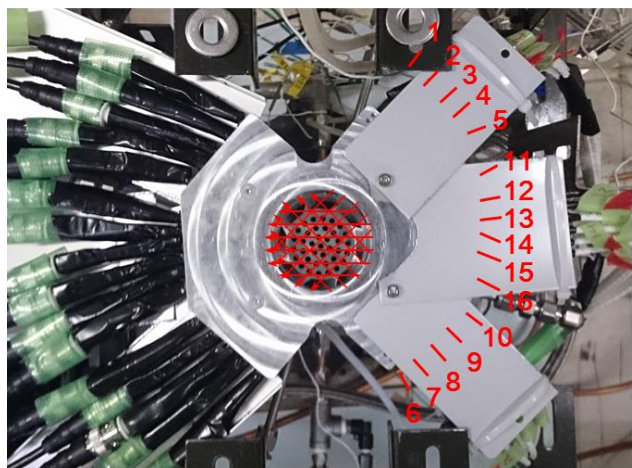


図 3.7-2 2次元メタン分布計測装置

第4章 実験結果・考察

4.1 温度計測基礎データベース構築

4.1.1 圧力校正用セル試験

1) 低圧セル(0.1-0.9MPa)

図 4.1.1-1 に 1330nm～1370nm を波長掃引可能な外部共振器型半導体レーザを用いて計測した常温において圧力を 0.1-0.9MPa 変化させた場合の水蒸気吸収スペクトルを示す。図 4.1.1-1 のグラフから、圧力上昇に従い、波長の重なり部分が増加していることが分かる。これは圧力上昇に伴いブロードニング現象が発生していることを示している。走査範囲の狭いレーザではブロードニング現象発生すると吸収スペクトルが重なり合うことで評価が難しい。しかし新たに走査範囲の長いレーザを使用することでブロードニング現象が発生しても評価ができることが確認された。

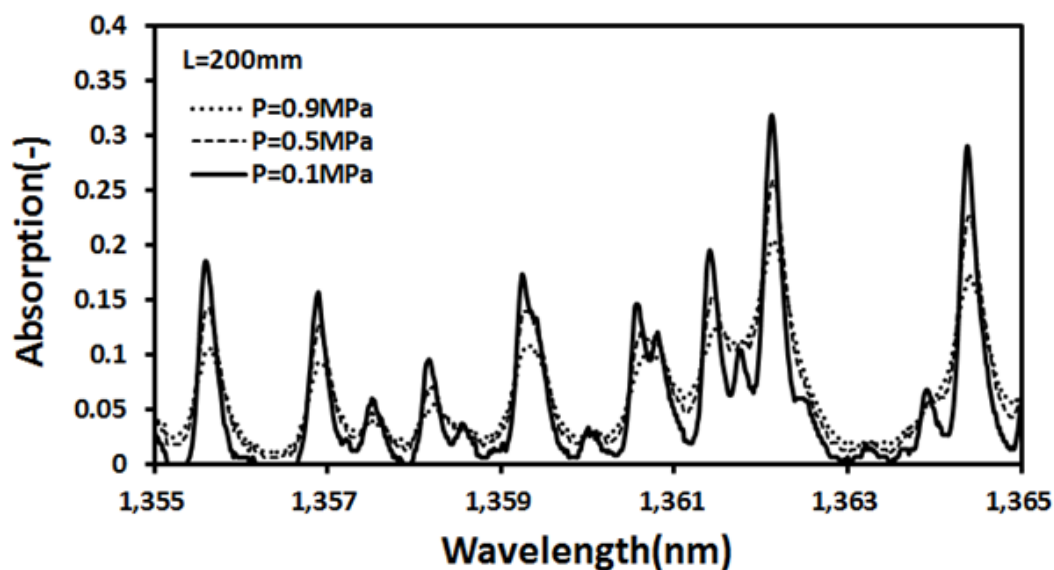
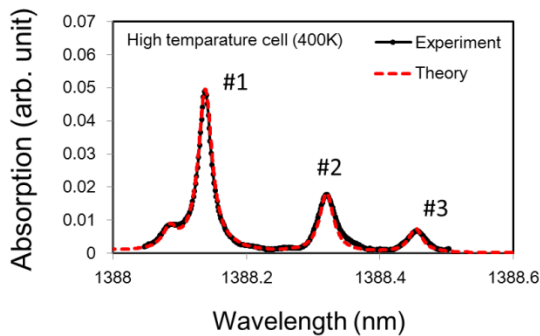


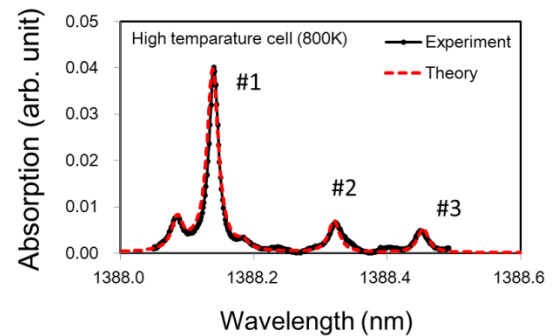
図 4.1.1-1 1330nm～1370nm を波長掃引可能な外部共振器型半導体レーザを用いて計測した水蒸気吸収スペクトル(300K, 0.1-0.9MPa)

2)高温・高圧セル(300-800K, 0.2-5MPa)

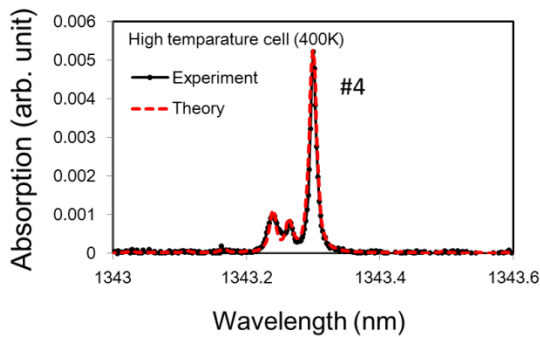
図 4.1.1-2 にセル温度を 400K 及び 800K とした際に、走査範囲 0.6nm の 1388nm 域及び 1343nm 域 DFB レーザを用いて計測した水蒸気吸収スペクトルとその温度における理論スペクトルの比較結果を示す。図 4.1.1-3 に 400K において計測した水蒸気の吸収スペクトルをもとに理論スペクトルを補正した結果を示す。HITRAN データベースでは#1/#2 吸収量比が実験値より低いため、低温域において温度を低く算出する傾向にある。低温域における HITRAN データベースの修正を行うことで、温度計測精度向上が可能となる。図 4.1.1-4 にセル温度を 400K 及び 600K とした際に 1330nm～1370nm を波長掃引可能な外部共振器型半導体レーザを用いて計測した水蒸気吸収スペクトルとその温度における理論スペクトルとのフィッティング結果を示す。低温場において温度計測に必要な吸収スペクトル評価が可能となることの目途を得た。



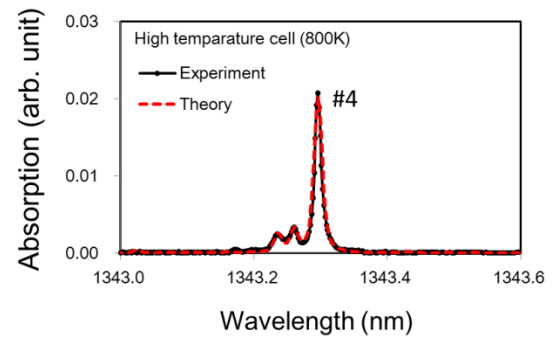
(a) 400K



(b) 800K

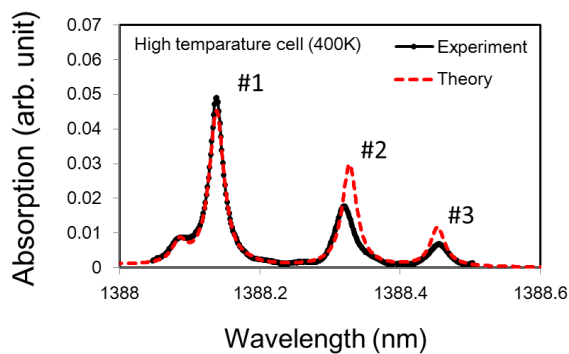


(c) 400K

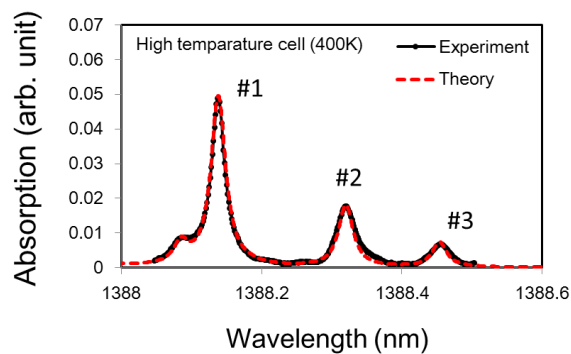


(d) 800K

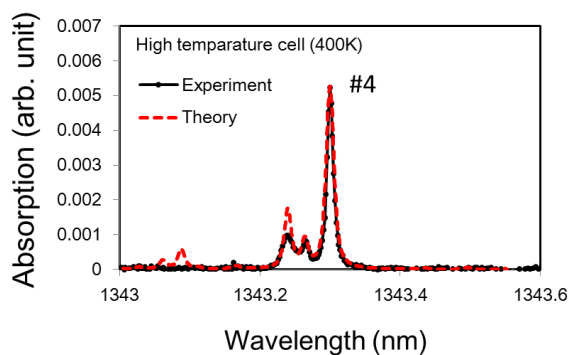
図 4.1.1-2 走査範囲 0.6nm の 1388nm 域及び 1343nm 域 DFB レーザを用いて計測した 400K と 800K での水蒸気の吸収スペクトル



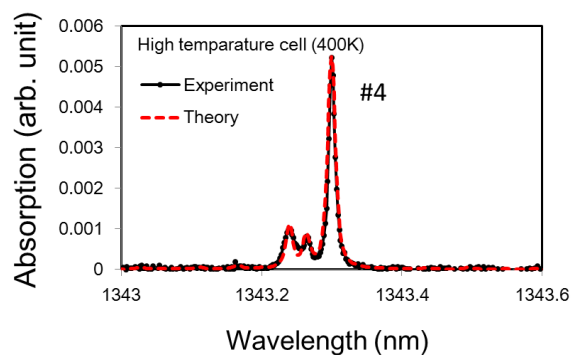
(a) 補正なし (1388nm)



(b) 補正あり (1388nm)

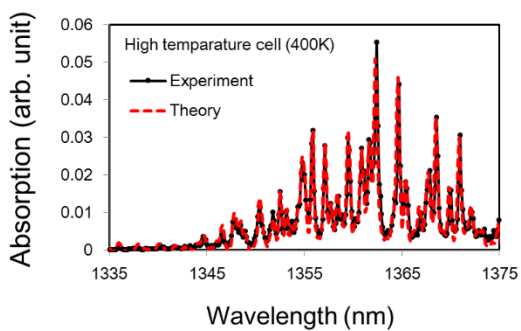


(c) 補正なし (1343nm)

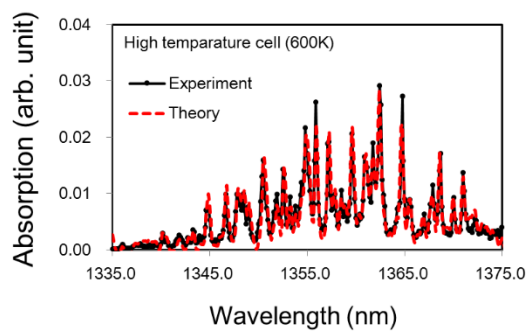


(d) 補正あり (1343nm)

図 4.1.1-3 データベースの補正例(400K)



(a) 400K

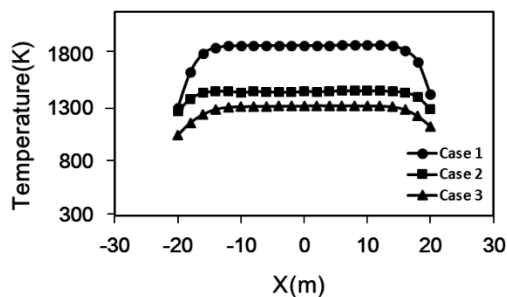


(b) 600K

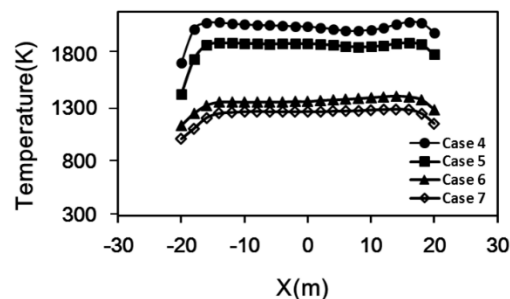
図 4.1.1-4 1330nm～1370nm を波長掃引可能な外部共振器型半導体レーザを用いて計測した 400K と 800K での水蒸気の吸収スペクトル

4.1.2 一次元バーナ試験

図 3.1.2-1 に示すフラットフレームバーナにおいて DFB 型及び外部共振型の 2 種類のレーザを用いて、水蒸気の吸収スペクトルを計測し、高温域における温度計測の特性評価を行った。熱電対を用いて光路上温度を 2mm 間隔で計測した結果を図 4.1.2-1 に示す。図 4.1.2-2 に熱電対計測温度 Case4 と Case7 において、走査範囲 0.6nm の 1388nm 域及び 1343nm 域 DFB レーザを用いて計測した水蒸気の吸収スペクトルを示す。図 4.1.2-3 に Case7 において計測した水蒸気の吸収スペクトルをもとに理論スペクトルを補正した結果を示す。HITRAN データベースでは #1/#2 吸収量比が実験値より高いため、高温域において温度を低く算出する傾向にある。また、実験値と HITRAN データベースのスペクトル強度に大きな誤差が見られ、HITRAN データベースの修正が必要であることが分かる。新たに 1000K 以上で顕著な吸収が現れる 1343nm 域の吸収スペクトルを用い、高温域における HITRAN データベースの修正を行うことで、2000K までの温度計測精度向上が可能となる。図 4.1.2-4 に熱電対計測温度 Case1 と Case3 において、1330nm～1370nm を波長掃引可能な外部共振器型半導体レーザを用いて計測した水蒸気の吸収スペクトルを示す。温度上昇に伴い吸収スペクトルの形状が変化し、かつ強度が減少していることが分かる。温度による吸収スペクトル形状変化では、温度上昇に伴い短波長側の吸収スペクトル強度が上昇している。これは、本波長域において、短波長側に下位エネルギー準位の低い吸収遷移が現れるためである。本試験において、波長掃引範囲の広い外部共振器型半導体レーザを使用しているため、複数の吸収線を同時に解析することが可能となり、高温・高圧場においても温度計測に必要な吸収スペクトル評価が可能となることの目途を得た。図 4.1.2-5 に 4.1.1 節、4.1.2 節の結果を踏まえ理論データベースの校正を行った結果を示す。HITRAN データベースの吸収線強度 $S_{i,j}(T)$ (温度依存性は吸収遷移の下位エネルギー値) を修正することにより、実験値との一致が改善する。高温・高圧場において温度計測精度向上のための精度良い分子データベースの構築を行った。



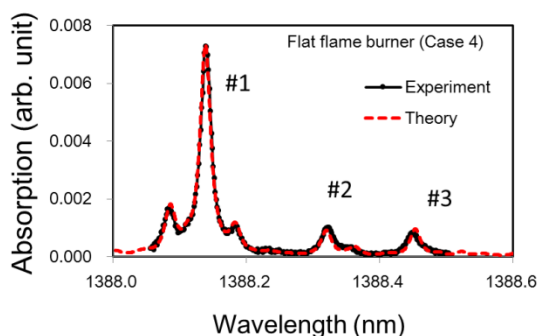
(a) 結果①



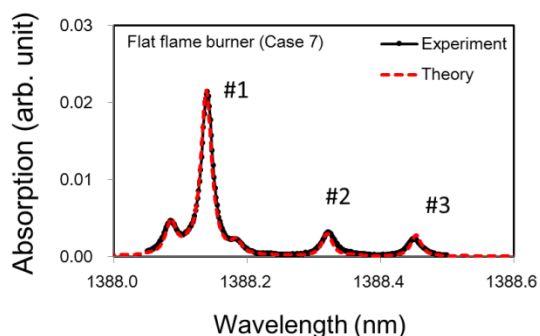
(b) 結果②

図 4.1.2-1 熱電対による温度計測結果 (輻射補正あり)

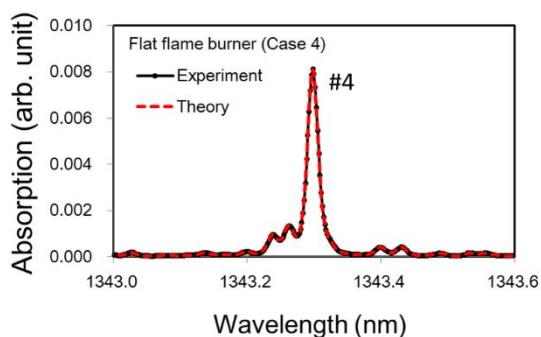
(フラットバーナ径: $D=45\text{mm}$, $\text{CH}_4=1.6 \times 10^{-5} \sim 2.7 \times 10^{-5} \text{ (m}^3/\text{s)}$, $\text{Air}=16 \times 10^{-5} \sim 27 \times 10^{-5} \text{ (m}^3/\text{s)}$, $\text{N}_2=33 \times 10^{-5} \text{ (m}^3/\text{s)}$)



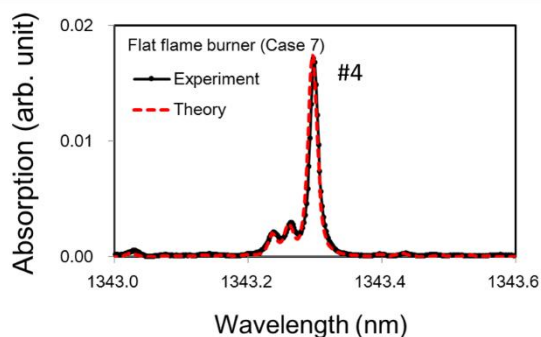
(a) Case4 (1388nm)



(b) Case7 (1388nm)

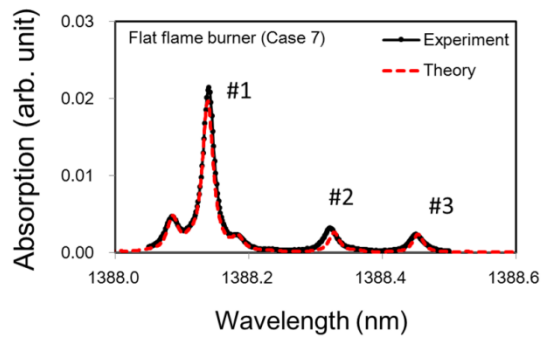


(c) Case4 (1343nm)

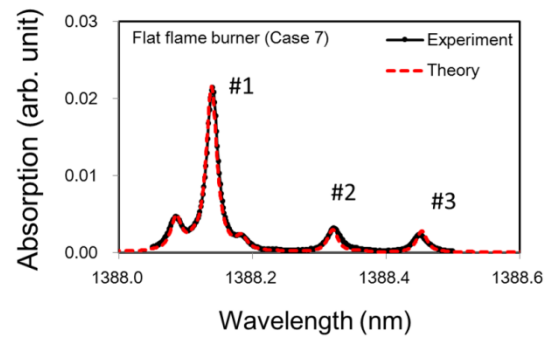


(d) Case7 (1343nm)

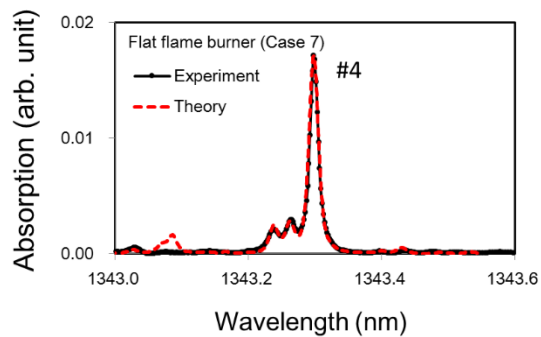
図 4.1.2-2 走査範囲 0.6nm の 1388nm 域及び 1343nm 域 DFB レーザを用いて計測した 1200K と 1800K での水蒸気の吸収スペクトル



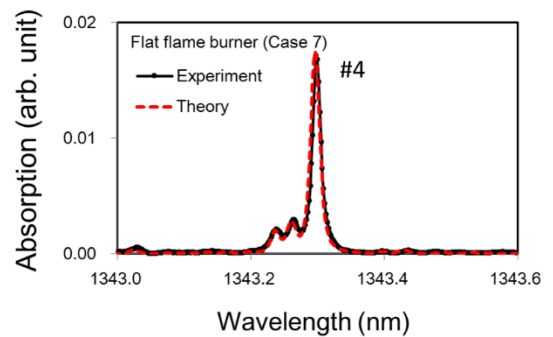
(a) 補正なし (1388nm)



(b) 補正あり (1388nm)

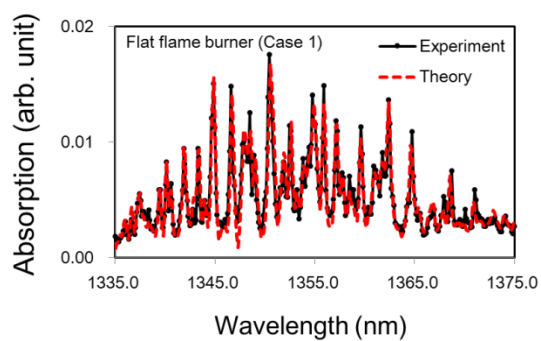


(c) 補正なし (1343nm)

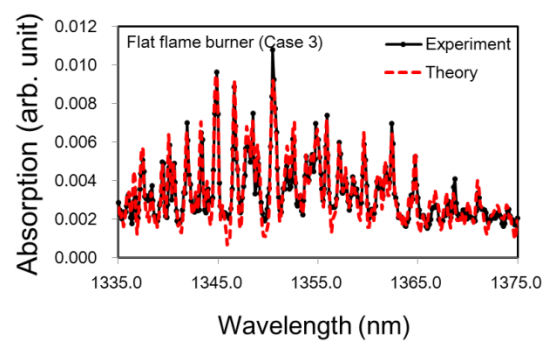


(d) 補正あり (1343nm)

図 4.1.2-3 データベースの補正例(Case7)

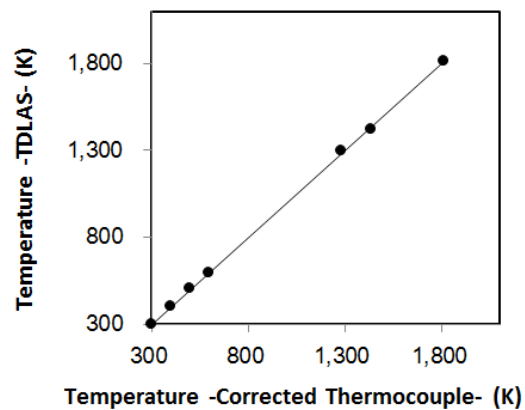
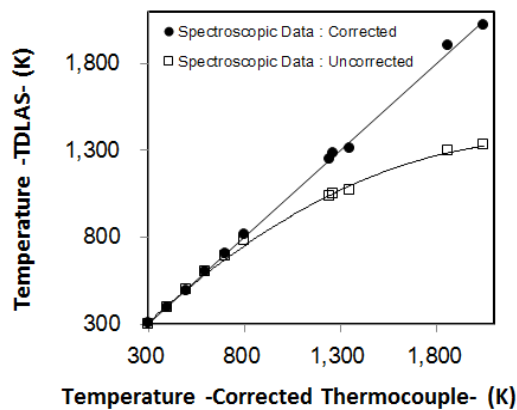


(a) Case1



(b) Case3

図 4.1.2-4 1330nm～1370nm を波長掃引可能な外部共振器型半導体レーザを用いて計測した 1300K と 1700K での水蒸気吸収スペクトル



(a) DFB レーザ

(1343.0-1343.6nm, 1388.0-1388.6nm)

(b) 外部共振器型半導体レーザ(高圧用)

(1335.0-1375.0nm)

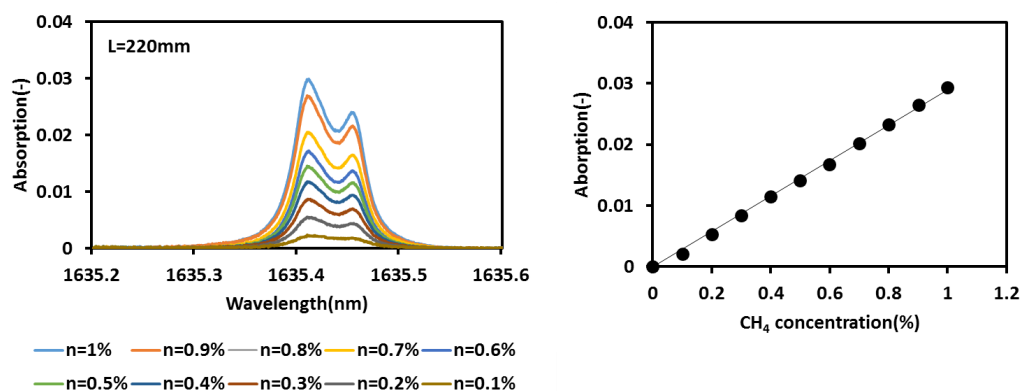
図 4.1.2-5 高温・高圧場データベース校正結果(0.1MPa).

4.2 濃度計測基礎データベース構築

4.2.1 メタン計測特性評価

1) メタン検出精度確認

メタン吸収波形及び計測線形性計測結果を図 4.2.1-1 に示す。吸収波形強度はメタン濃度に依存して低下しており、計測線形性は良好な値を示している。



(a)吸収波形計測 (b)線形性確認試験結果
(メタン吸収スペクトル波長：1635.411nm 及び 1635.456nm, 384 積算)

図 4.2.1-1 メタン吸収波形計測及び線形性確認試験結果

2) 吸収スペクトルの圧力依存性取得

① 0.1～0.9MPa における吸収スペクトル変化

メタンガスと窒素ガス(メタン濃度 1%)を計測セルに導入し、圧力を 0.1～0.9MPa まで上げて、1635nm で走査範囲 0.6nm の DFB レーザ(NTT エレクトロニクス社 NLK1U5FAAA)でメタン吸収スペクトルを計測し、0.1～0.9MPa までの線幅パラメータを取得した結果を図 4.2.1-2 に示す。計測された吸収スペクトルは圧力を上昇させるにつれてブロードニングし、長波長側へシフトすることが確認できた。

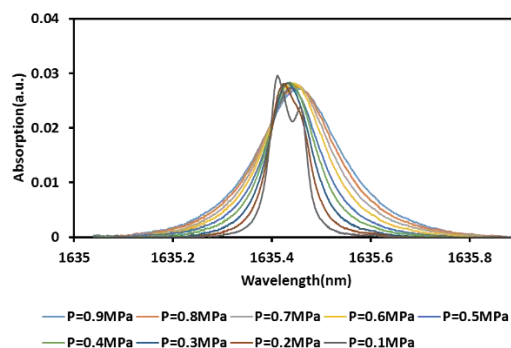


図 4.2.1-2 0.1～0.9MPa までのメタン吸収スペクトル線幅パラメータ取得

② 0.1MPa±8kPa の吸収スペクトル変化

メタンガスと窒素ガス(メタン濃度 5%)を計測セルに導入し、圧力を 0.1MPa±8kPa に設定し、1635nm で走査範囲 0.6nm の DFB レーザ(NTT エレクトロニクス社 NLK1U5FAAA)でメタン吸収スペクトルを計測した。0.1MPa±8kPa の吸収スペクトルを取得した結果を図 4.2.1-3 に示す。数 kPa の圧力変動による吸収スペクトル変化は確認できるが、変化は微小であり、吸収スペクトル変化から圧力を補正することは精度的に難しいと考えられる。

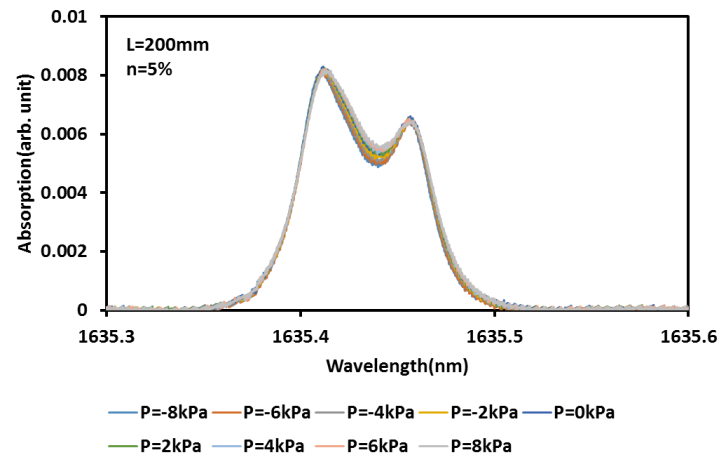
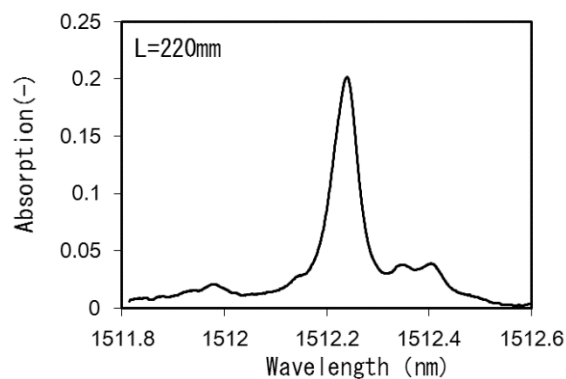


図 4.2.1-3 -8kPa～8kPa までのメタン吸収スペクトル変化

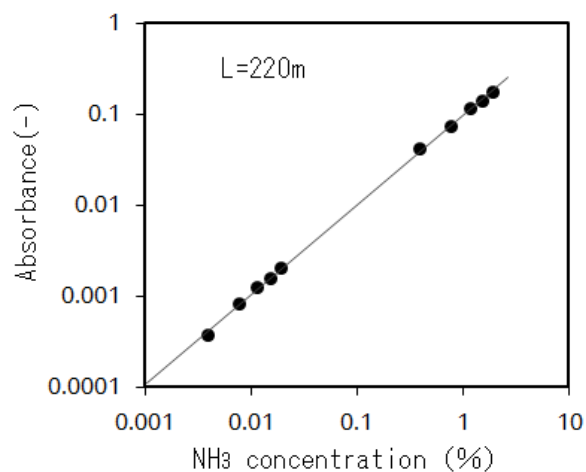
4.2.2 アンモニア計測特性評価

1) アンモニア検出精度確認

NH_3 検出感度確認計測結果(低濃度域・高濃度域)を図 4.2.2-1 に示す。高濃度域，低濃度域の線形性を同グラフで確認するために，目盛は対数を取っている。グラフより，吸光度は NH_3 濃度に依存して増加していることが確認できる。低濃度域，高濃度域ともに，計測線形性は良好な値を示している。この結果より，半導体レーザ吸収法による NH_3 吸光度と NH_3 濃度には良い線形性が保たれるといえる。



(a) 計測されたアンモニア吸収スペクトル



(b) 濃度-吸光度線形性結果

図 4.2.2-1 NH_3 検出感度確認計測結果

2)実ガスでの計測特性評価

エンジン排ガスに NH_3 添加した計測結果を図 4.2.2-2 に示す。図 4.2.2-2 は、 NH_3 検出感度確認計測結果(\circ)と温度補正を行った本計測の結果(\bullet)を濃度に変換したものである。横軸は流量により決定した濃度、縦軸は計測により得た吸収スペクトルより算出した濃度を表す。 NH_3 標準ガスを N_2 ガスで調整した場合の計測濃度と、排ガスで調整した場合の計測濃度は、ほぼ同一線上に存在している(半導体レーザ吸収法では N_2 の影響は受けない)。この結果より、半導体レーザ吸収法ではエンジンの排ガスに影響なく NH_3 濃度を計測できるといえる。

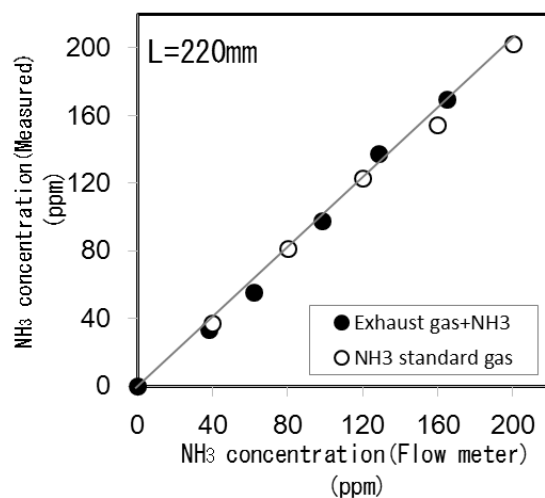


図 4.2.2-2 エンジン排ガスに NH_3 添加した計測結果

4.3 CT-半導体レーザ吸収法を用いた 2 次元温度・濃度分布計測装置開発

4.3.1 16パス計測セル

図 4.3.1-1 に CT 半導体レーザ吸収法計測セルの概略及び写真を示す。対象化学種の吸収スペクトルを計測するために、半導体レーザを使用した。半導体レーザ(LD)は活性層の温度により発振波長が変化する特性を持つ。この特性を利用すると、LD に入力する電流値を変化させて波長スキャンを行い、波長に対する吸収量の変化を連続的に計測できる。レーザのスキャン周波数は 1~5kHz で、図 4.3.1-1 に示す CT 計測セルを用いて、数 ms 毎の吸収スペクトルを計測した。レーザ光はファイバスプリッタにより分岐され、コリメータ(THORLABS, 50-1310-APC)で対象物に照射される。透過光はフォトダイオード(浜松フォトニクス, G8370-01)によって検知され、500kHz, 1 スキャンあたり 500 点の吸収スペクトルデータを記録計(日置電気, メモリハイコーダ 8861)に取り込んだ。各パスの吸収スペクトルは、図 2.5.3 に示す CT アルゴリズムに使用され、温度及び濃度が求められる。

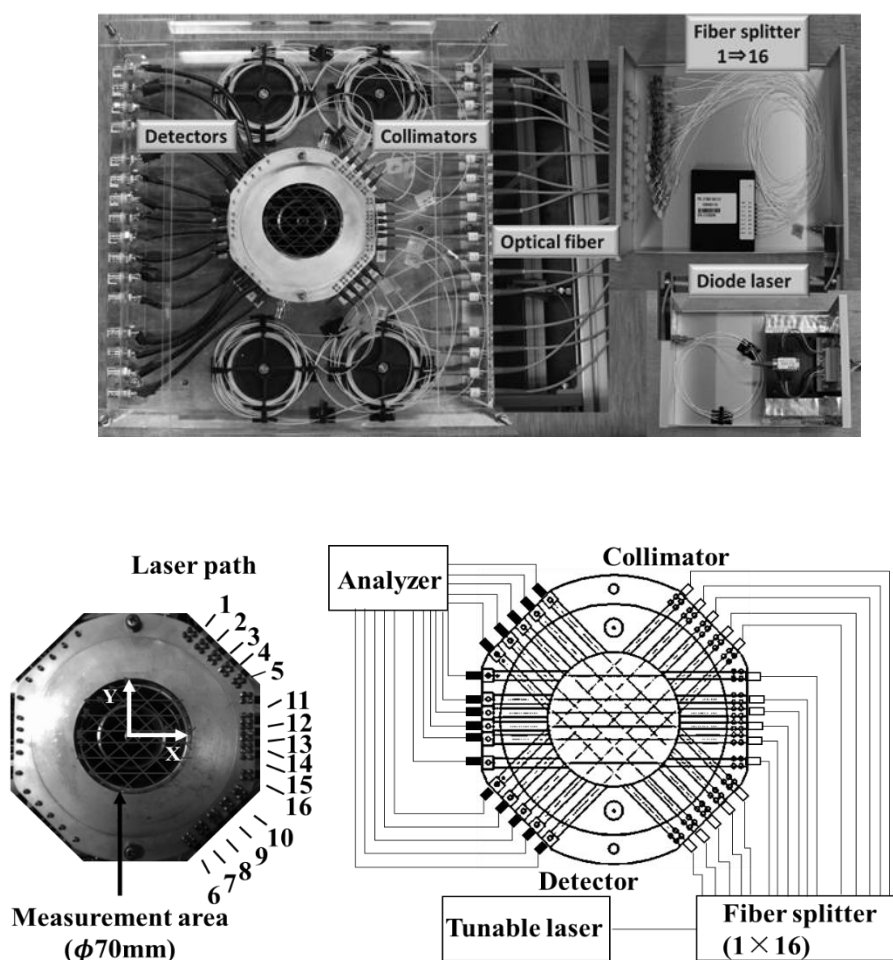


図 4.3.1-1 16 パス CT 計測セル

4.3.2 32パス計測セル

空間分解能と計測精度の向上を目的とし、32パス計測セルを開発した。装置の全体写真を図4.3.2-1に示す。図4.3.2-2に32パス計測セルの図面を示す。

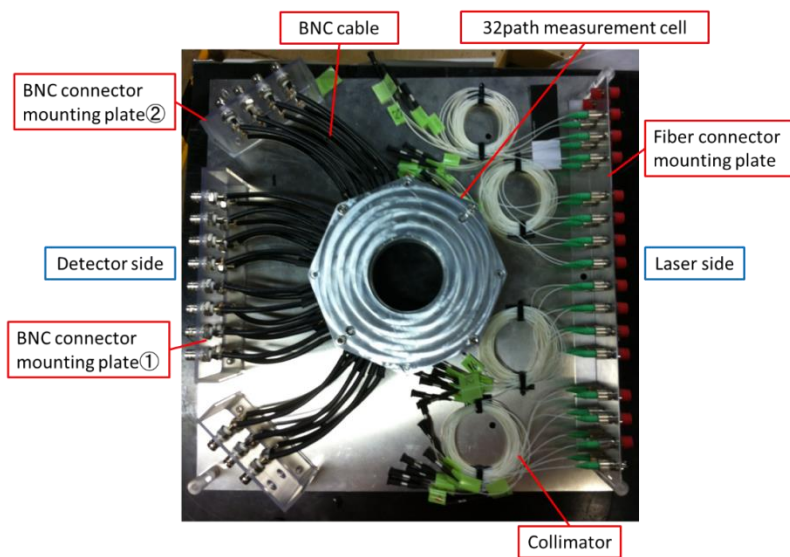


図 4.3.2-1 32パス CT 計測セル

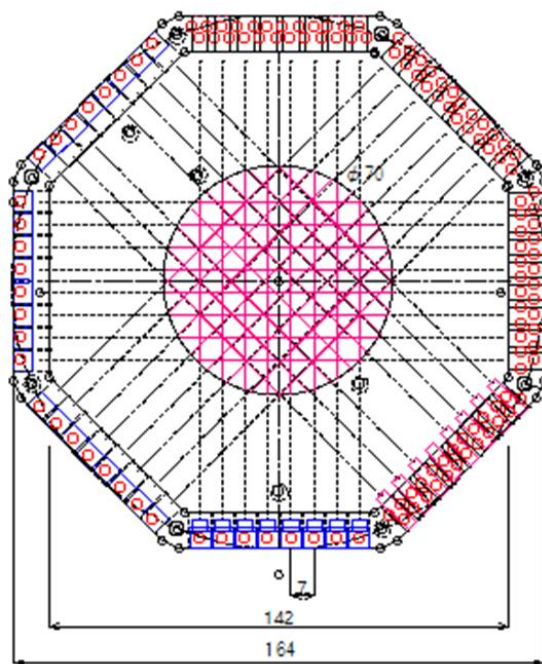
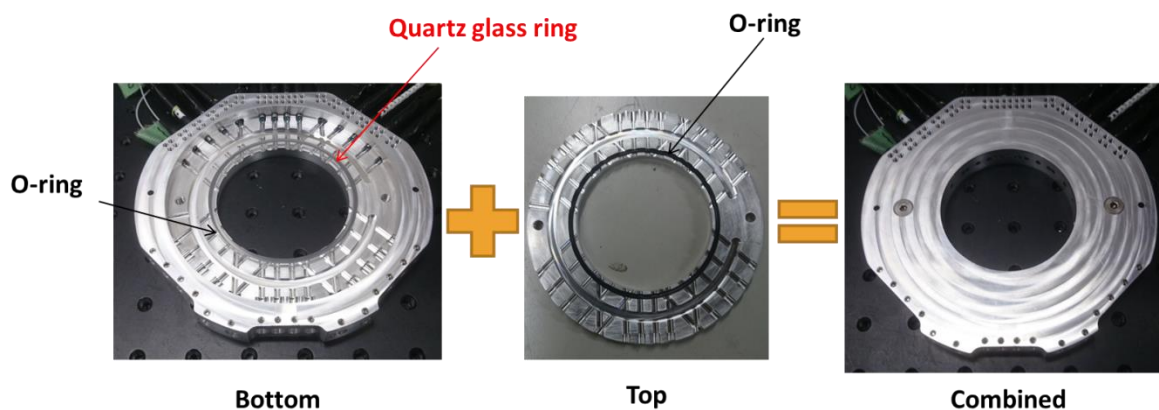


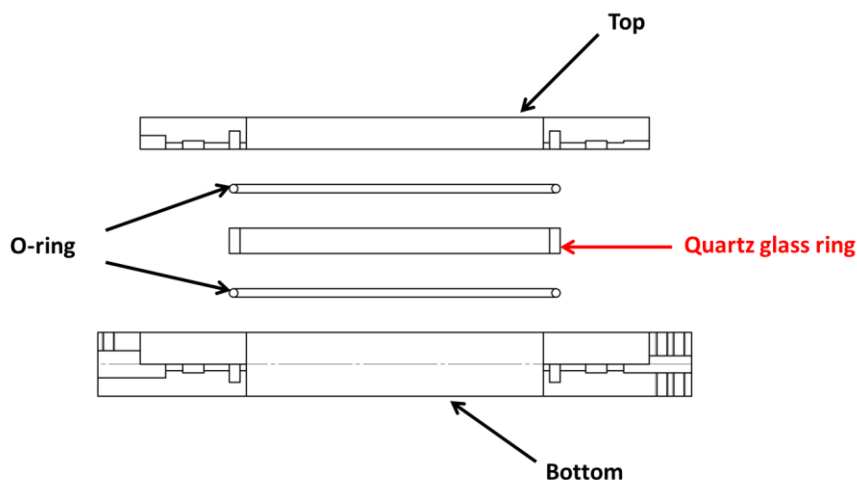
図 4.3.2-2 32パス計測セル図面

4.3.3 高圧場適用可能な CT 計測セルプロトタイプ

定容燃焼器に導入可能な CT 計測セルの製作を行った。現在の計測セルはレーザ光路にレンズ等を設置していない。そのため、計測場が高圧の場合は計測対象がセル側に流入してしまうため計測ができない。新たな CT 計測セルでは石英円環ガラスを内側に設けることで計測場を乱すことなく計測を可能にした。高圧場適用可能な CT 計測セルプロトタイプ概要を図 4.3.3-1、実際の CT 計測セル写真を図 4.3.3-1 (a)、石英円環ガラスの設置方法を図 4.3.3-1 (b) に示す。また、CT 計測セルの図面を図 4.3.3-2、石英円環ガラス写真を図 4.3.3-3 に示す。CT 計測セルは上下に分離しており、石英円環ガラスと計測セルに O リングを設置することで計測場の気密を保った。各レーザ光路は石英円環ガラスの屈折を考慮して設計を行った。CT 計測セル光路内に存在する水蒸気除去のための窒素ページに関する説明図を図 4.3.3-4 に示す。温度計測のために水蒸気スペクトルを用いているため、計測エリア外の水蒸気を除去する必要がある。なお、石英円環ガラスがあるため、窒素ガスは計測エリアに流入しない。

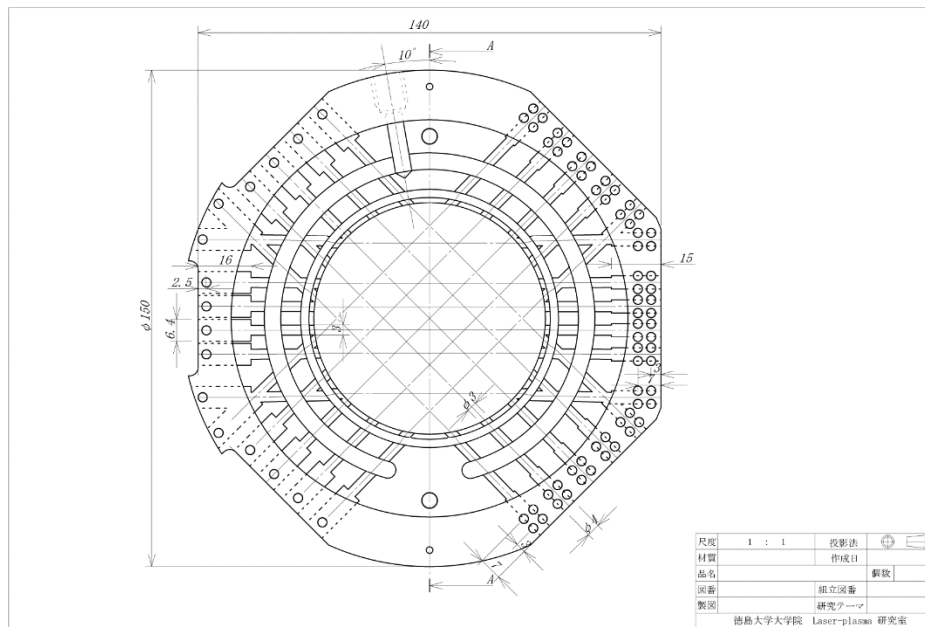


(a) 写真

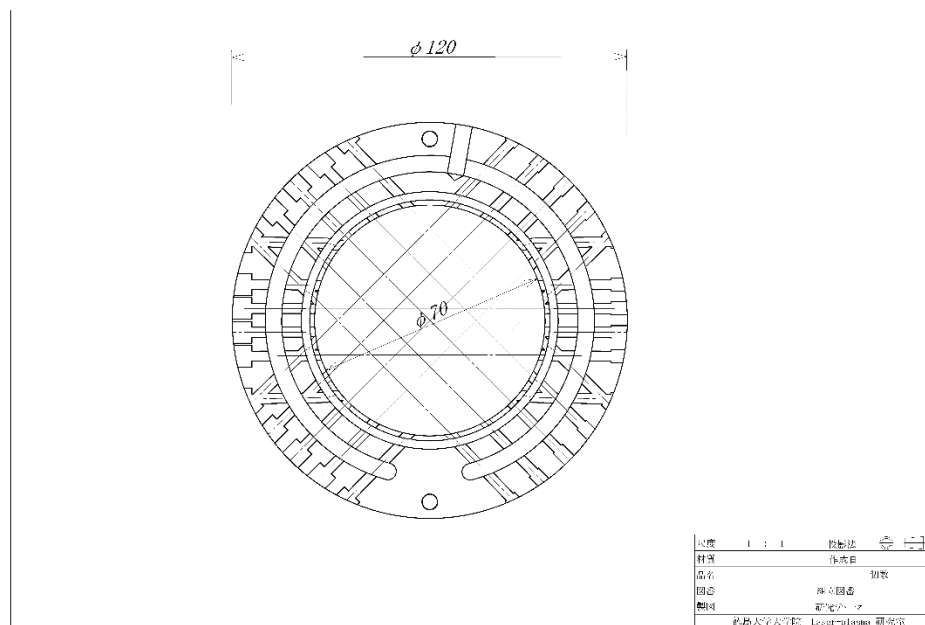


(b) CT 計測セル構成と石英円環ガラスの設置方法

図 4.3.3-1 高圧場適用可能な CT 計測セルプロトタイプ



(a) 計測セル下部



(b) 計測セル上部

図 4.3.3-2 高圧場対応 CT 計測セル図面

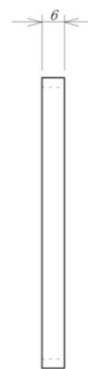
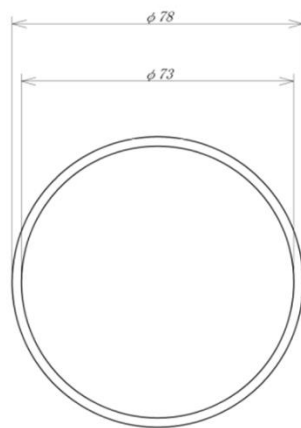


図 4.3.3-3 石英円環ガラス

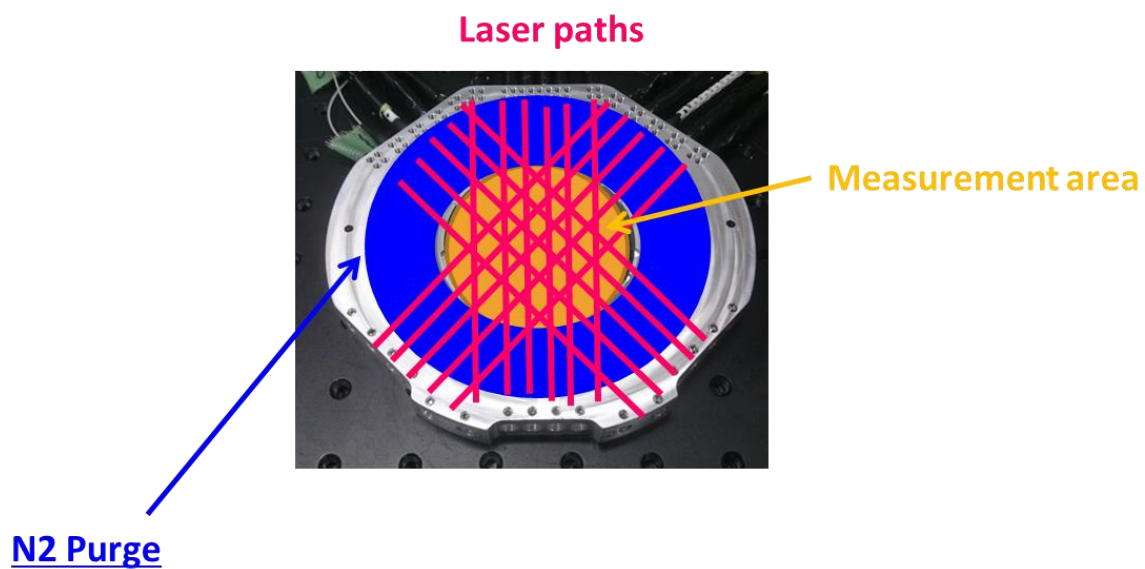


図 4.3.3-4 CT 計測セル内部に存在する水蒸気除去のための窒素パージ

4.4 2次元温度分布計測特性評価

4.4.1 ブンゼンバーナ火炎温度計測

CT 法及び熱電対でバーナ火炎上の温度分布計測を行った結果を図 4.4.1-1 に示す。CT 計測セルを用いて計測された各レーザパスの吸収スペクトルを Fig.2.25 に示す CT アルゴリズムに適用して、再構成された温度分布を図 4.4.1-1 (a) に示す。解析では、各レーザパスに対し、光路上で補間を行い、解析点を増加する方法を採用した。計測領域の温度を線径 100 μ m の熱電対にて測定した温度結果を図 4.4.1-1 (b)に、Y=0 mm, -4 mm, -8 mm における CT 再構成温度との比較結果を図 4.4.1-2 に示す。温度の高い領域が計測セル中央部に存在し、中央部から 10mm 近傍の地点で温度低下していることが分かる。図 4.4.1-2 (b), (c)に示す Y=-4mm, -8mm の結果において、火炎中心部 X=-4mm ~ 4mm(620K-950K)の平均温度誤差は 46K(6%)であり、温度分布形状も一致を示している。熱電対と CT 半導体レーザ吸収法の計測は完全な同時計測ではないこと考慮すると両計測結果は矛盾せず、CT により温度分布が再構成できているといえる。

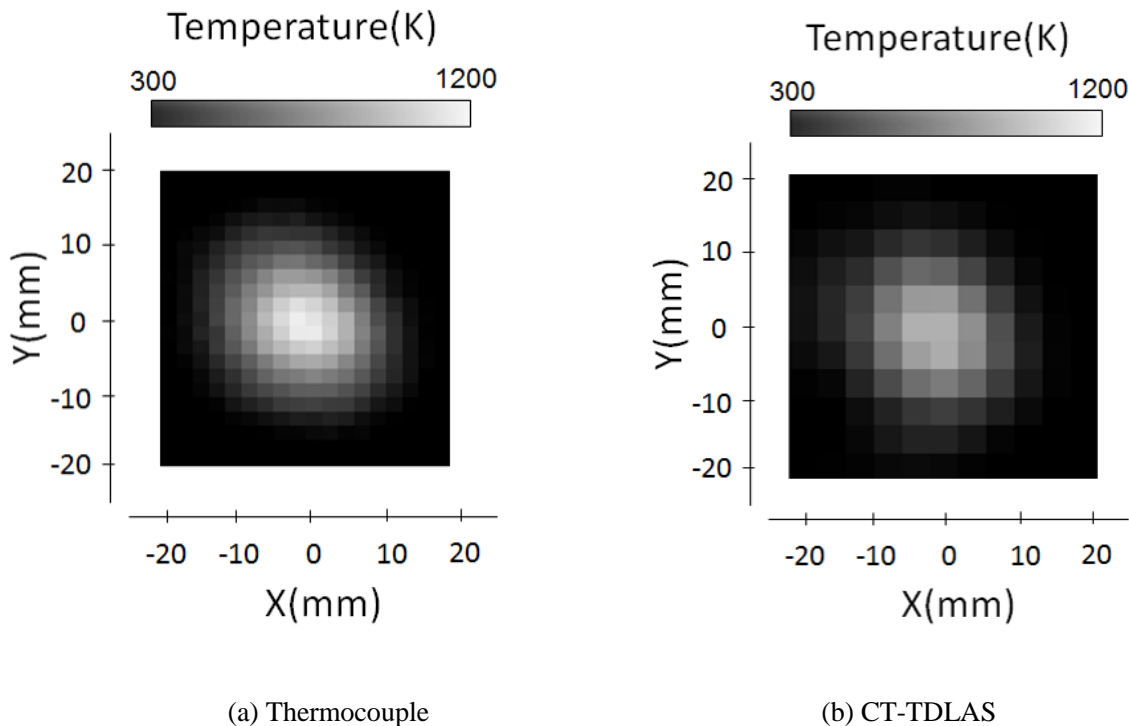
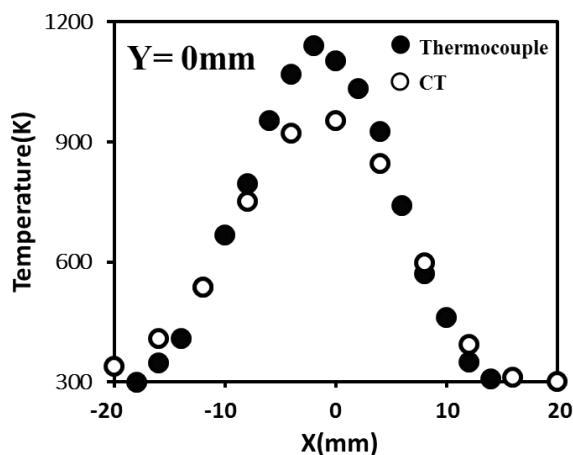


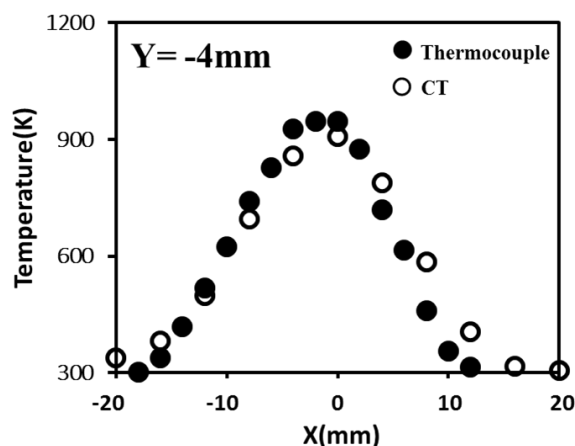
図 4.4.1-1 2次元温度計測結果

(Bunsen burner: D=8mm, CH₄=1.2x10⁻⁵ (m³/s), Air=5.7x10⁻⁵ (m³/s))

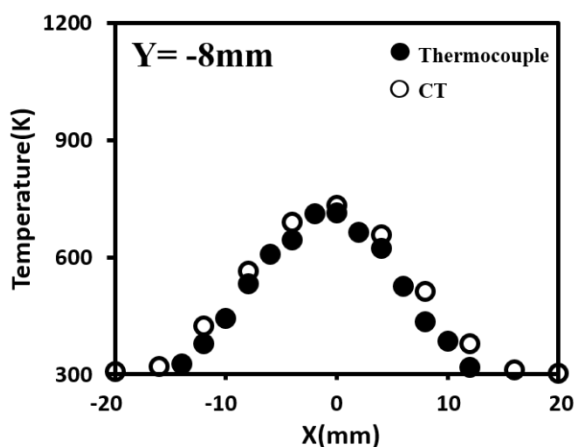
一方、図 4.4.1-2 (a)に示す $Y=0\text{mm}$ での計測結果では、火炎中心部($X=0\text{mm}$)で熱電対と CT 半導体レーザー吸収法の計測結果に不一致が生じており、図 4.4.1-3 に示す熱電対と CT 半導体レーザー吸収法の計測結果の比較を見ると、CT 半導体レーザー吸収法の計測結果が 100K 以上低い値を示している。これは、CT 解析では、解析領域内で温度の平均化が行われ、密度の大きい低温部分に温度が引きずられる傾向が生じることに起因している。また、HITRAN データベースにおける高温域(1000K 以上)での吸収線強度信頼性の検証も必要と考えられる。なお、温度計測精度は、吸収線の組合せの他、CT 解析精度(レーザーパス数、測定体積内の温度分布など)にも影響される。



(a) $Y=0\text{mm}$



(b) $Y=-4\text{mm}$



(c) $Y=-8\text{mm}$

図 4.4.1-2 $Y=0\text{ mm}$, -4 mm , -8 mm における CT 再構成温度と熱電対温度の比較結果

CT 解析において、収束性及びその精度は初期値の温度、水蒸気濃度分布の選定が重要となる。また、温度依存性の異なる複数の吸収線を用いることは解析の安定性を向上する上で有効であり、多項式ノイズ除去法を用いたスペクトルフィッティング法も安定性向上に寄与している。

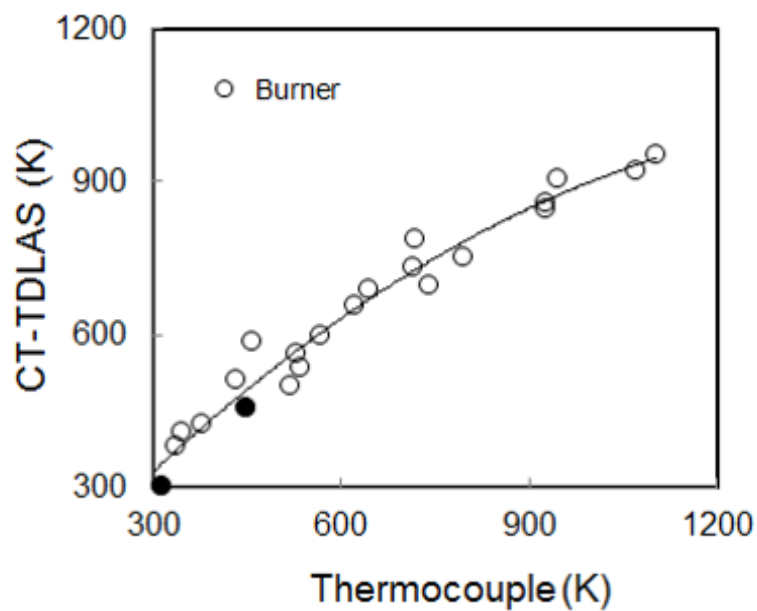


図 4.4.1-3 CT 再構成温度と熱電対温度の比較結果

4.4.2 微粉炭バーナ温度計測

CT 計測セルで微粉炭燃焼火炎直上の 2 次元温度時系列計測を行った。表 4.4.2-1 に流量条件を、表 4.4.2-2 に計測条件を示す。図 4.4.2-1 に実験で得られた微粉炭火炎を示す。図 4.4.2-2 にメタン - 空気火炎および微粉炭火炎において CT 法及び熱電対により計測した温度分布結果を示す。図 4.4.2-3 にメタン-空気火炎において CT 法及び熱電対により計測した Y=0mm における温度分布の比較結果を示す。CT 法で計測された温度結果は熱電対により計測された結果 (輻射補正なし) と良い一致を示している。図 4.4.2-4 に微粉炭火炎において CT 法により計測した温度分布結果を示す。微粉炭火炎では微粉炭による散乱やレーザ光の吸収が生じる。これは、微粉炭によってレーザ光が遮られている事を意味し、スペクトル形状の変化が生じた場合でも、半導体レーザ吸収法では、その変化よりも高速な周波数 (数[kHz]から数十[kHz]) で波長掃引を行うため、微粉炭などによるレーザ光の減衰が生じて、波長に対する測定分子の吸収量の変化を連続的に計測できる。また、微粉炭のような外乱によるレーザ光の揺らぎの影響を自己補正し、対象吸収量を評価できる。CT 半導体レーザ吸収法を用いて、微粉炭火炎での 2 次元温度計測を実証した。

表 4.4.2-1 流量条件

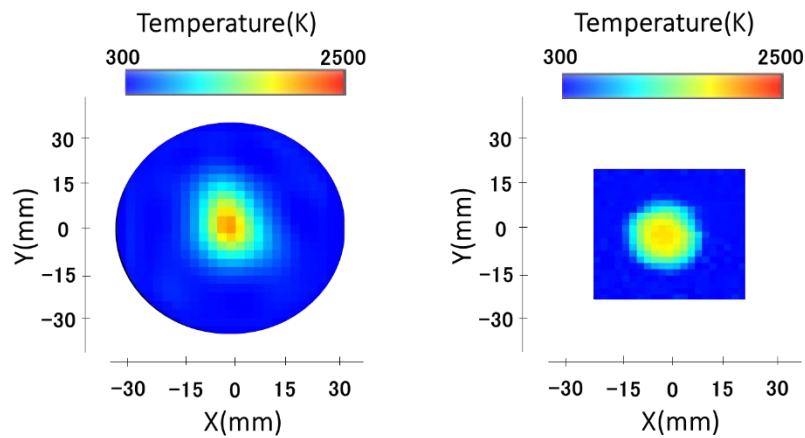
	CH4 (L/min)	Coal (g/min)	Feeder dry air/ Mixed air (L/min)	Com pressed air (L/min)	Ambient air (L/min)
CH4-Air flame	0.35	0	2	0	80
Pulverized coal flame	3	0.85	2.9	27	80

表 4.4.2-2 レーザ条件

1388 [nm]				1343 [nm]			
LD Driver		FG		LD Driver		FG	
Temp.	22.8℃	Frequ ency	5[kHz]	Temp.	27.8℃	Frequ ency	5[kHz]
LD Limit	250 [mA]	Period	0.2[ms]	LD Limit	250 [mA]	Perio d	0.2[ms]
IF	143.293 [mA]	Ampli tude	1.6[vpp]	IF	102.792 [mA]	Ampl itude	0.9[vpp]
IV	1.5155 [V]	Offset	+1500 [mv]	IV	1.4233 [V]	Offset	+1500 [mv]



図 4.4.2-1 確認された微粉炭火炎



(a) CT-TDLAS

(b) 熱電対

図 4.4.2-2 メタン-空気火炎において計測された 2 次元温度分布

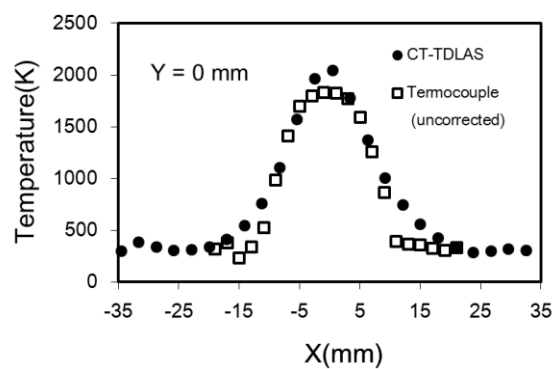


図 4.4.2-3 メタン-空気火炎において CT 法及び熱電対により計測した $Y=0\text{mm}$ における温度分布の比較結果

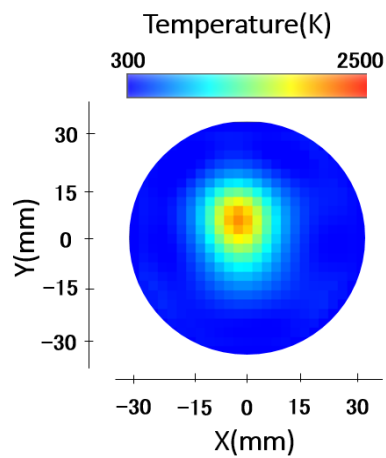
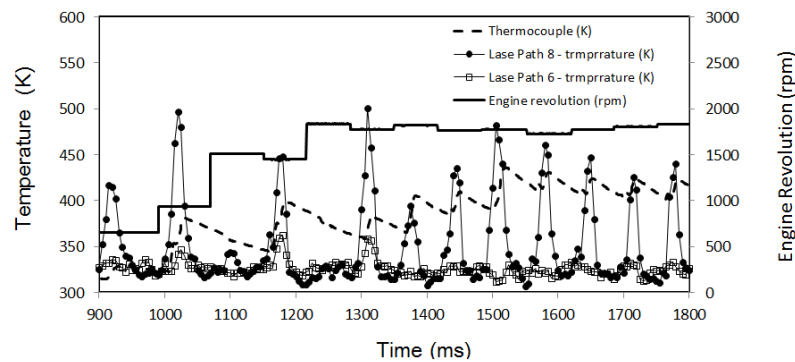


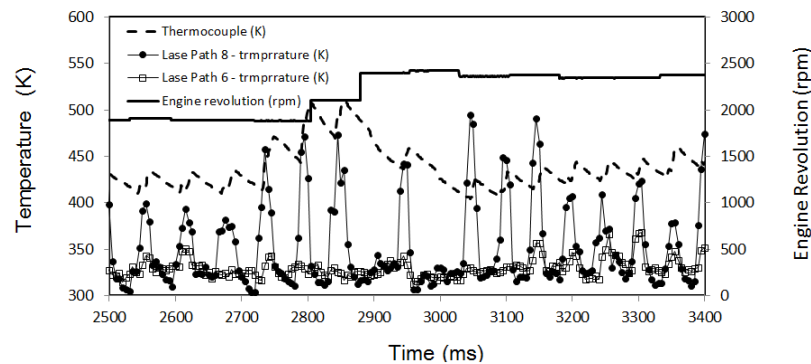
図 4.4.2-4 微粉炭火炎において計測された 2 次元温度分布

4.4.3 エンジン排気ガス温度計測

図 4.4.3-1 にエンジン始動時より 5 秒間のレーザパス 6, 8 で計測された平均温度の時系列計測結果, 熱電対による温度とエンジン回転数の結果を, 図 4.4.3-2 にエンジン始動直後の $t=1$ 秒付近における 2 次元温度時系列計測結果を示す. エンジンの排気管は計測セルの中央部($X=Y=0\text{mm}$)に設置されており, 熱電対が T1($X=Y=0\text{mm}$)及び T2($X=-12\text{mm}, Y=12\text{mm}$)の地点に置かれ, CT を用いた半導体レーザ吸収法と同時に熱電対による温度計測を実施した. 計測セル中央部に高温域が存在し, 中央部から 12mm の地点では急激に温度低下している. CT 解析による温度分布は, 熱電対との温度計測結果とも良い一致を示しており, 温度が良好に再構築されていることが分かる.



(a) 900-1800ms (エンジンスタート後)



(b) 2500-3400ms (エンジンスタート後)

図 4.4.3-1 レーザパス 6, 8 で計測された平均温度の時系列計測結果

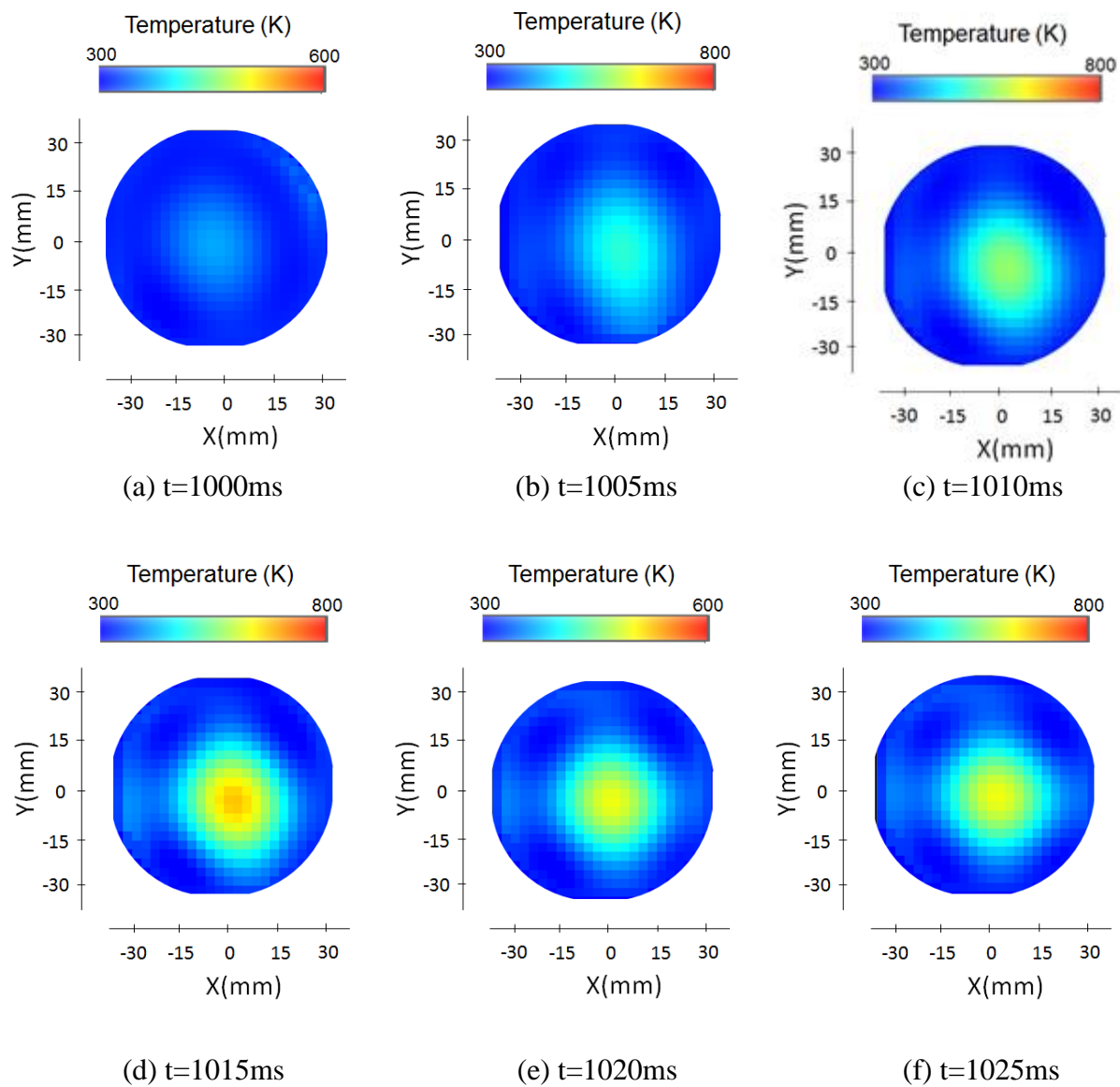


図 4.4.3-2 2次元温度時系列計測結果

4.4.4 高温・高圧域における2次元温度分布計測の特性評価

1) 高圧場対応 CT 計測セルによる燃焼試験(低圧)

図 4.4.4-1 に燃焼させた際の点火プラグへのトリガ信号と圧力波形を、図 4.4.4-2 に火炎認識可能画像を基準とした燃焼画像を示す。図 4.4.4-3 に 1388nm, 1343nm 域 DFB レーザ及び外部共振器型半導体レーザを用いて計測した圧力上昇時における水蒸気の吸収スペクトルを示す。図 4.4.4-3 (a) に示すように波長掃引範囲の狭い DFB レーザではブロードニング効果により吸収線の重なりが生じ、0.6MPa 程度までは評価可能であるが、1MPa 以上になると評価が難しくなると予測される。一方、図 4.4.4-3 (b) に示すように波長掃引範囲の広い外部共振器型半導体レーザでは圧力上昇に伴いブロードニングした吸収スペクトルを評価可能であり、計測する温度依存性の異なる複数の吸収線の選定が重要となる。図 4.4.4-4 に 1388nm, 1343nm 域 DFB レーザを用いて計測された水蒸気の吸収スペクトルに CT 法を適用することにより得られた $t=30\text{ms}$ 及び $t=100\text{ms}$ における 2 次元温度分布計測結果を示す。大気圧~0.6MPa 程度までは波長掃引範囲の狭い DEB レーザを用いて温度算出が可能である。

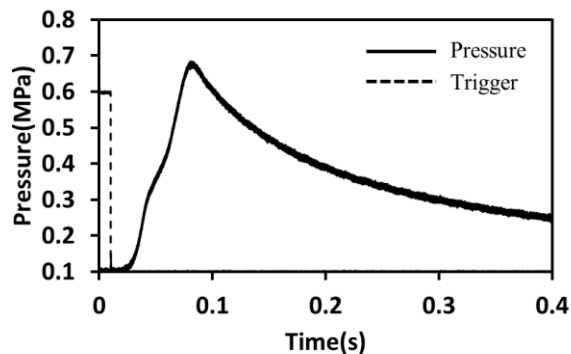


図 4.4.4-1 点火プラグへのトリガ信号と圧力波形

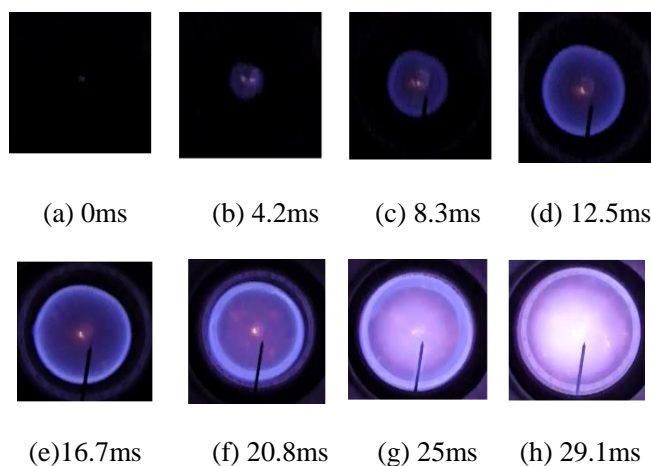
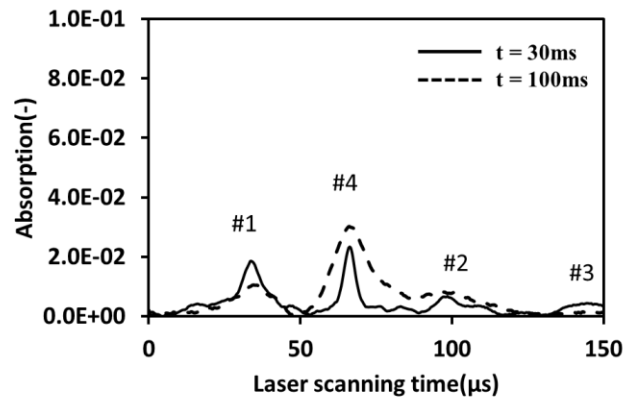
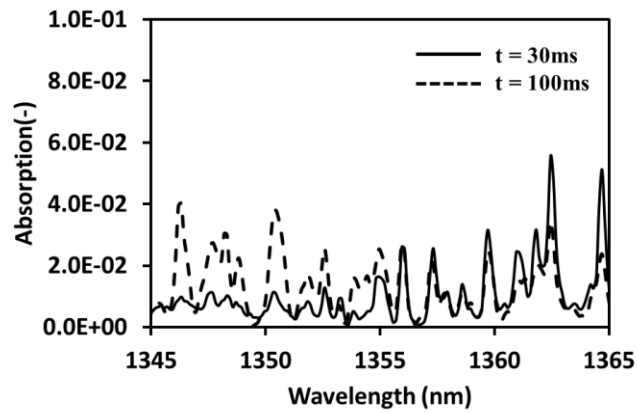


図 4.4.4-2 燃焼画像

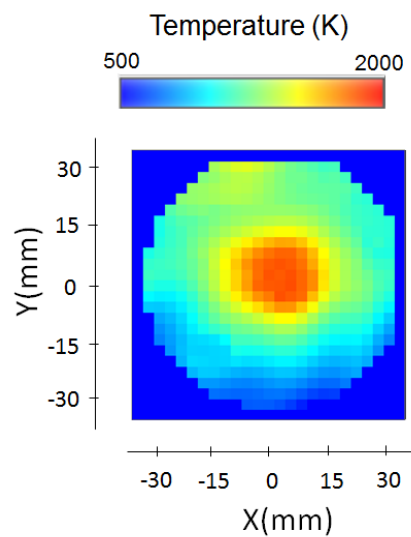


(a) DFB type laser diode

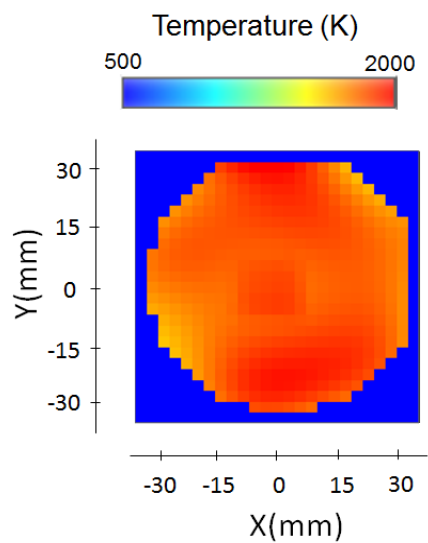


(b) External cavity type laser diode

図 4.4.4-3 1388nm, 1343nm 域 DFB レーザ及び外部共振器型半導体レーザを用いて計測した圧力上昇時における水蒸気の吸収スペクトル



(a) $t = 30\text{ms}$



(b) $t = 100\text{ms}$

図 4.4.4-4 1388nm, 1343nm 域 DFB レーザを用いて計測された水蒸気の吸収スペクトルに CT 法を適用することにより得られた $t=30\text{ms}$ 及び $t=100\text{ms}$ における 2 次元温度分布計測結果

2)高圧場対応 CT 計測セルによる燃焼試験(高圧, DFB レーザ)

定容燃焼器を用いて、高圧場が CT 計測セルに対して及ぼす影響を調査した。燃焼確認試験と同様に、燃料にはメタンと空気の混合気を使用した。初期圧を 0.5MPa、当量比を 1 として試験を行った。図 4.4.4-5 に燃焼させた際の点火信号と圧力波形を、図 4.4.4-6 に火炎認識可能画像を基準とした燃焼画像を示す。最高燃焼圧 4MPa が得られており、高圧燃焼が達成されていることが確認できた。また、1388nm, 1343nm 域 DFB レーザを用いて計測された水蒸気スペクトルを図 4.4.4-7 に示す。図 4.4.4-7 では、レーザ光強度をプロットしており、水蒸気の吸収信号はシグナル強度の低下として 0.00025ms 毎に計測されている。全ての圧力にて吸収波形を確認できるが、圧力ブロードニングにより各吸収ラインの重なりが生じている。吸収波形を確認が確認できていることより、本手法の高温・高圧燃焼への適用の目途を得たが、高圧場では、広い波長範囲を掃引できるレーザが必要であることが確認された。

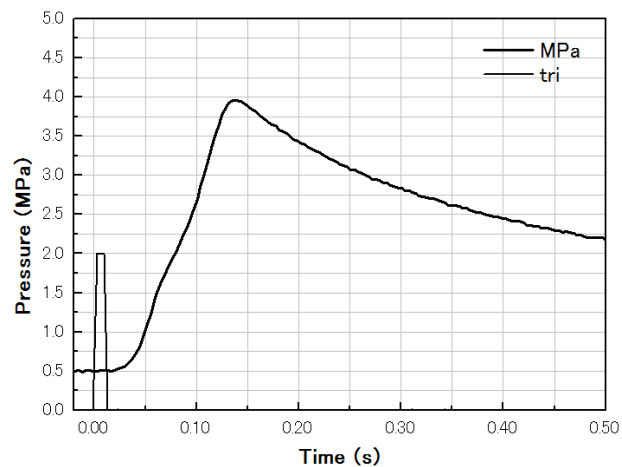


図 4.4.4-5 点火信号と圧力波形

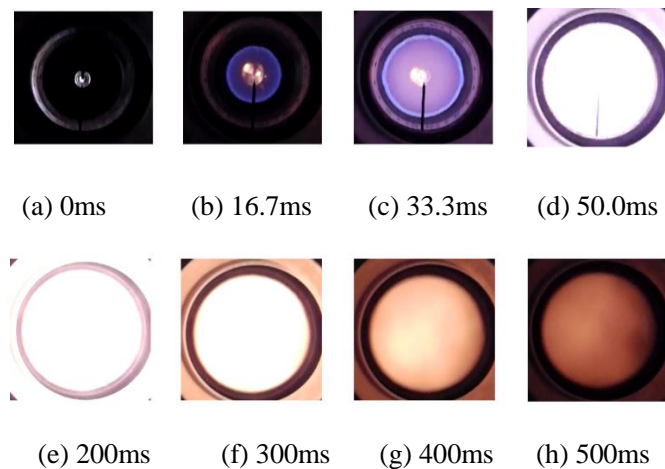
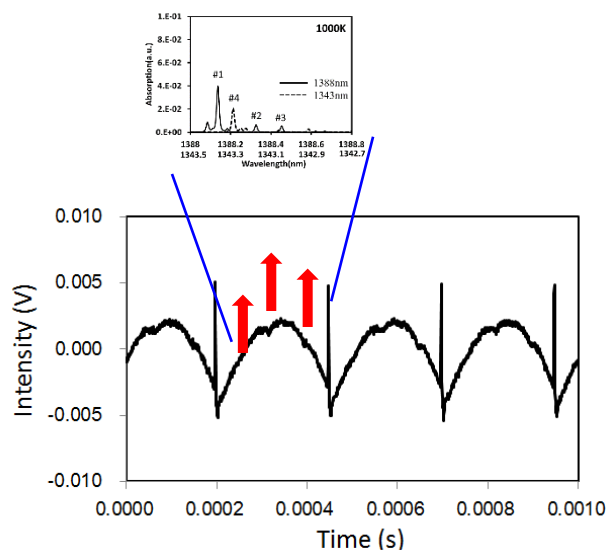
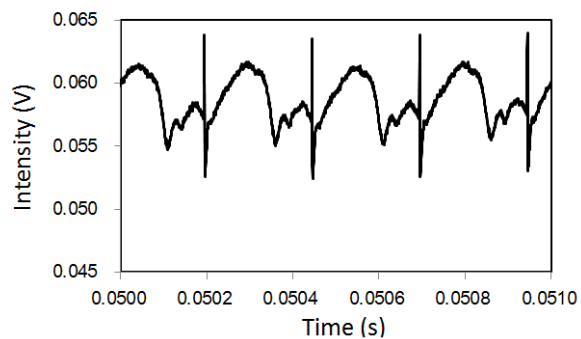


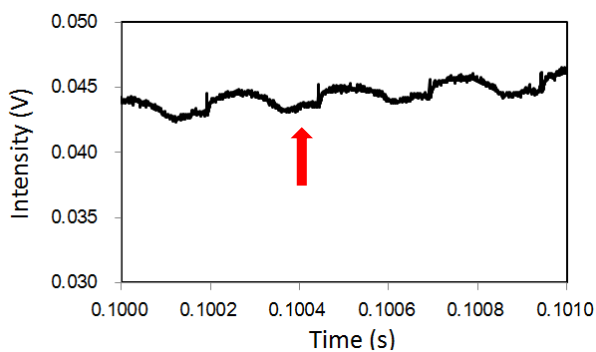
図 4.4.4-6 燃焼画像



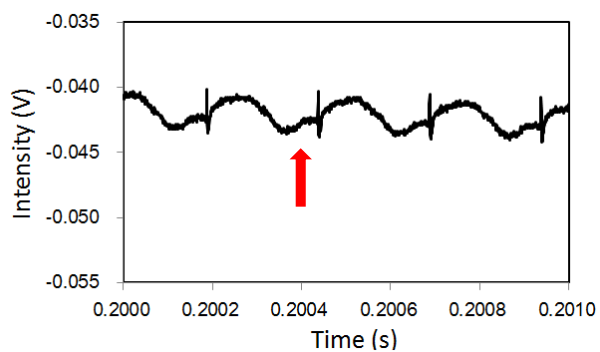
(b) 0s, 0.5MPa



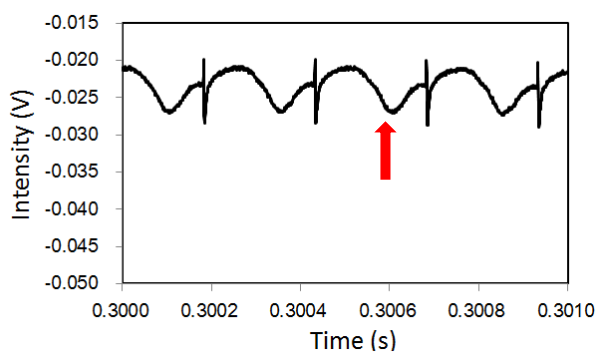
(c) 0.05s 0.7MPa



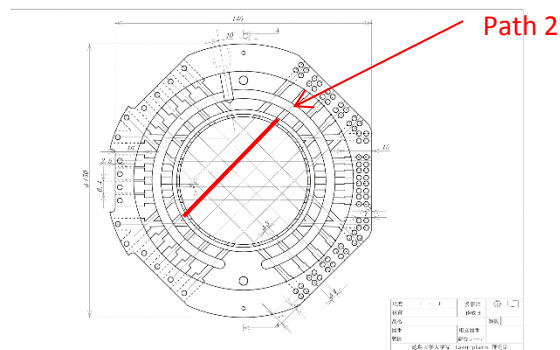
(d) 0.1s, 2.3MPa



(e) 0.2s 3.5MPa



(f) 0.3s, 2.8MPa



(a) 計測セル レーザパス 2

図 4.4.4-7 1388nm, 1343nm 域 DFB レーザを用いて計測されたレーザパス 2 での水蒸気スペクトル計測結果(吸収波形はシグナル強度の低下として計測される)

3)高圧場対応 CT 計測セルによる燃焼試験(高圧, 外部共振器型半導体レーザ)

表 4.4.4-1 に 実験条件を示す. 図 4.4.4-8, 図 4.4.4-9 に燃焼させた際の圧力波形と熱電対の温度結果を示す. 図 4.4.4-10 に CT 計測セルにおけるレーザパス 3, 8, 12, 16 配置, 図 4.4.4-11 及び図 4.4.4-12 に試験条件④, ⑤において, 光源に外部共振器型半導体レーザを使用した CT 計測セルを用いて計測されたレーザパス 3 での水蒸気スペクトル計測結果及び理論スペクトルとのフィッティング結果を示す. 波長掃引範囲の広い外部共振型半導体レーザでは圧力上昇に伴いブロードニングした吸収スペクトルを評価可能である. また, CT 計測セル窓部のくもりによって(今回計測セルの窓部のヒーティングが十分に行えなかったため), 光透過率が 20% 程度になったが, 吸収スペクトルの評価が十分に可能である. 図 4.4.4-13 及び図 4.4.4-14 に各試験条件において, CT 計測セルの各レーザパスで計測された時系列温度結果(半導体レーザ吸収法_各レーザパス平均温度)と圧力・熱電対温度計測結果を示す. CT 計測セルの各レーザパスで計測された時系列温度結果は熱電対で計測された温度結果(輻射補正なし)と良い一致を示している.

図 4.4.4-15, 図 4.4.4-16 に試験条件③における圧力波形及び燃焼画像を示す. $t=0\text{ms}$ で点火プラグによる着火が生じ, $t=30\text{ms}$ 程度で火炎が燃焼器壁に到達すると共に, CT-TDLAS 計測部にも到達する. また, レーザ計測結果及び熱電対比較試験において火炎発光によりフォトダイオードが飽和し計測不可能な領域においても火炎発光を除去するフィルタを用いることで計測可能となることを確認した. 図 4.4.4-17 に試験条件③において CT 計測セルを用いて計測した水蒸気の吸収スペクトルに CT 法を適用することにより得られた $t=35\text{ms}$ 及び $t=86\text{ms}$ における 2 次元温度分布計測結果を示す. 図 4.4.4-17 に示すように燃焼器内で火炎が球状に広がり, $t=35\text{ms}$ で CT 計測セル断面に火炎が到達した際の温度分布が計測され, $t=86\text{ms}$ では, ほぼ均一な温度分布となることが分かる. 本手法を用いることで高温・高圧場においても燃焼状態に応じた温度算出が可能となる. 高圧場において波長掃引範囲の広いレーザを用いることで, 圧力上昇に伴いブロードニングした吸収スペクトルを精度良く評価することができ, 高温・高圧場での 2 次元温度計測が可能となる目途を得た.

表 4.4.4-1 実験条件

	Test number	Initial pressure [MPa]	Combustion pressure(Calculated) [MPa]	CH ₄ flow rate [MPa]	Air flow rate [MPa]	Equivalent ratio [-]
Combustion	①	0.1	0.687	0.5	5	1
	②	0.2	1.374	1.1	5	
	③	0.3	2.062	1.9	5	
	④	0.4	2.749	3	5	
	⑤	0.75	5.154	4.5	2.1	

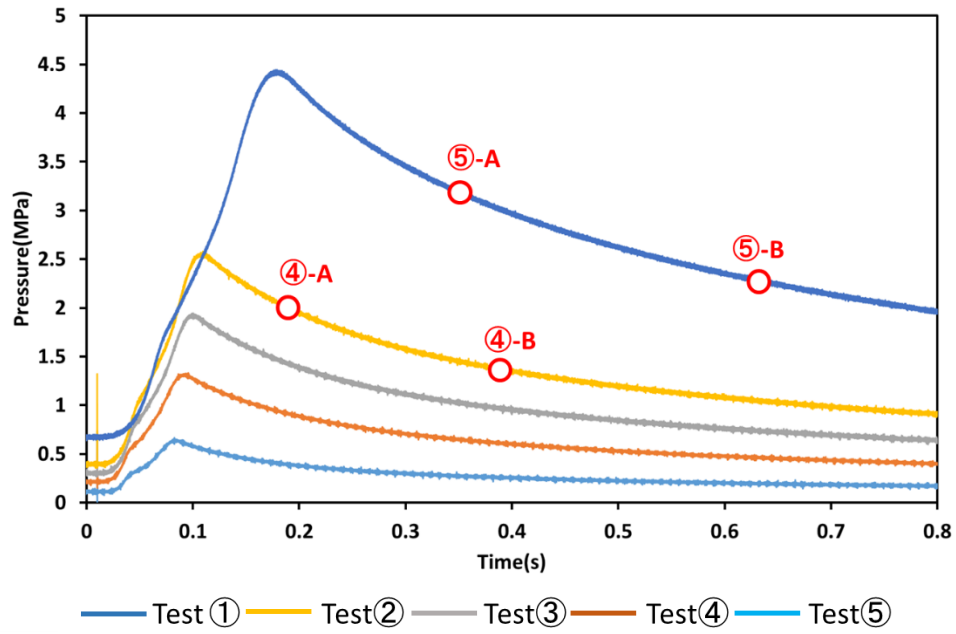


図 4.4.4-8 压力波形

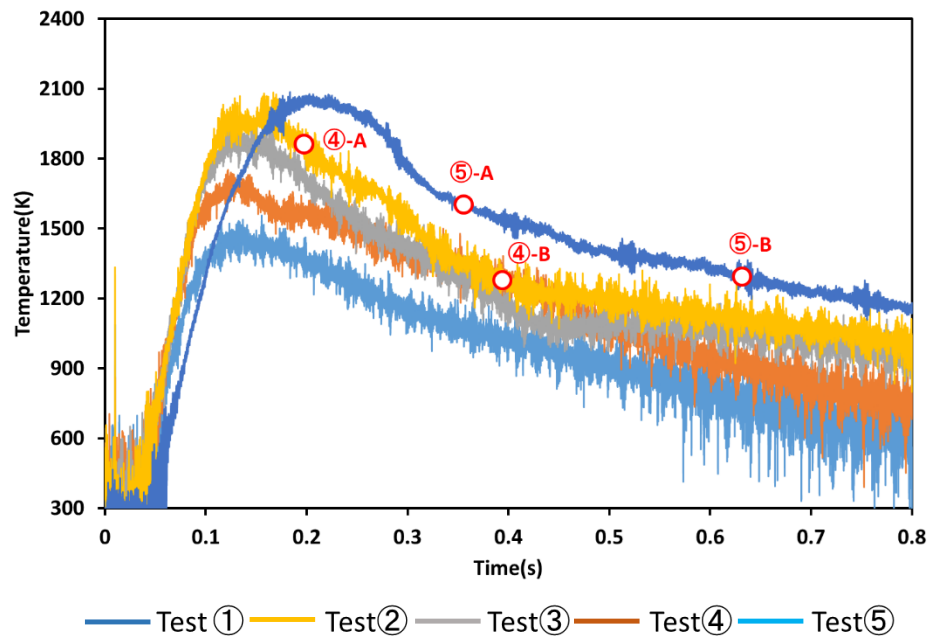


図 4.4.4-9 熱電対温度計測結果

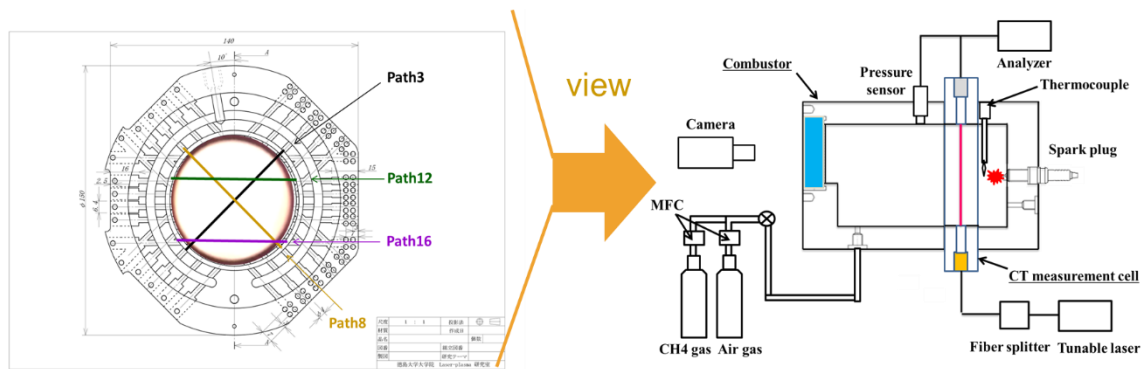
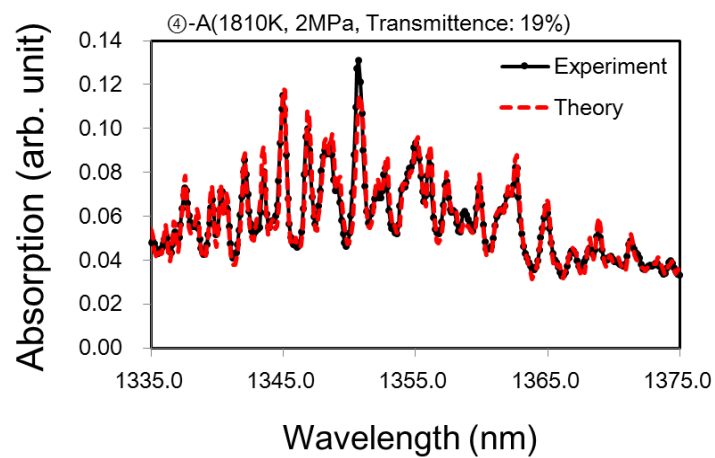
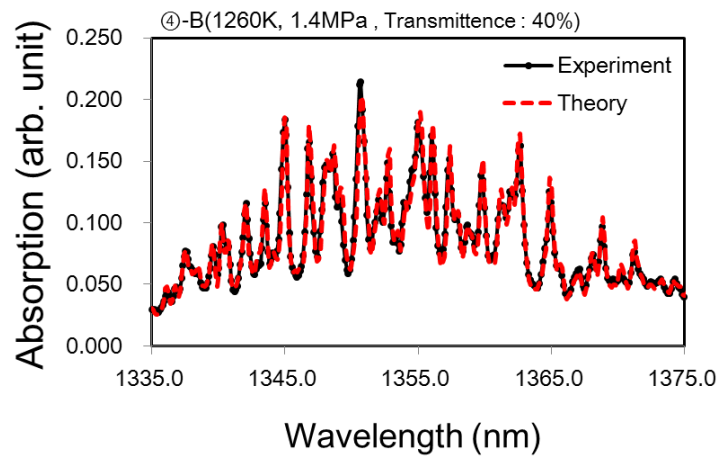


図 4.4-10 CT 計測セルにおけるレーザパス 3, 8, 12, 16 配置

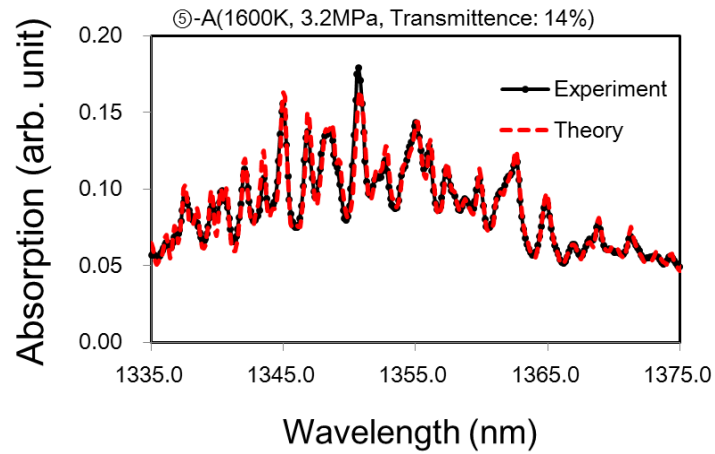


(a) ④-A(1810K, 2MPa, Transmittance: 19%)

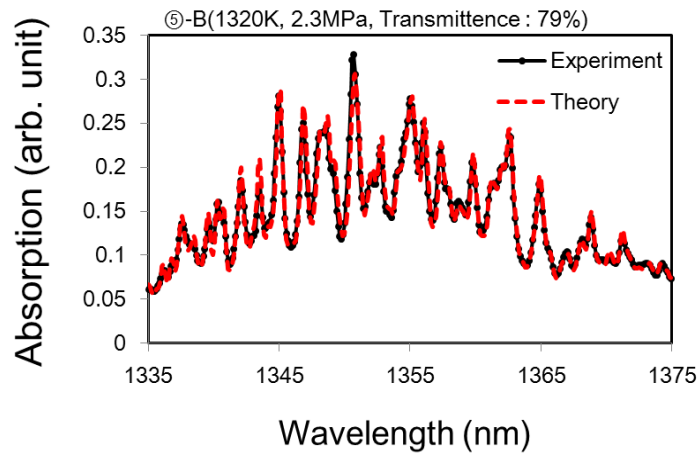


(b) ④-B(1260K, 1.4MPa, Transmittance : 40%)

図 4.4-11 試験条件④において, CT 計測セルを用いて計測されたレーザパス 3 での水蒸気スペクトル計測結果

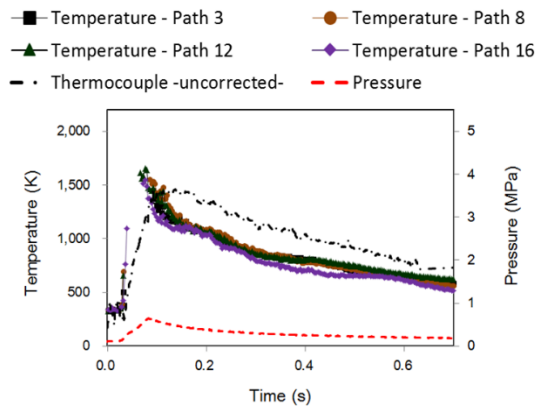


(a) ⑤-A(1600K, 3.2MPa, Transmittance: 14%)

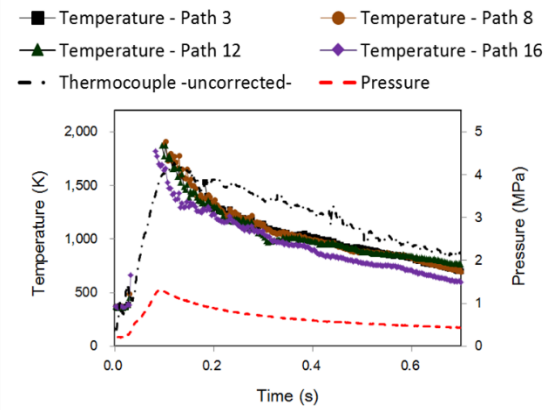


(b) ⑤-B(1320K, 2.3MPa, Transmittance : 79%)

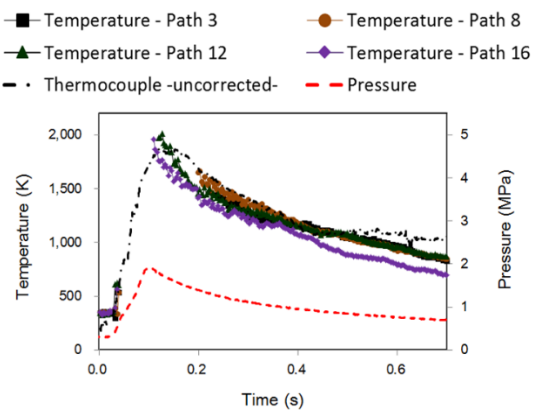
図 4.4.4-12 試験条件⑤において、CT 計測セルを用いて計測された
レーザパス 3 での水蒸気スペクトル計測結果



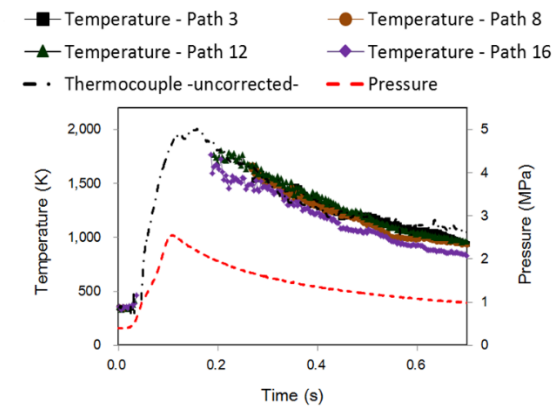
(a) 試験条件①



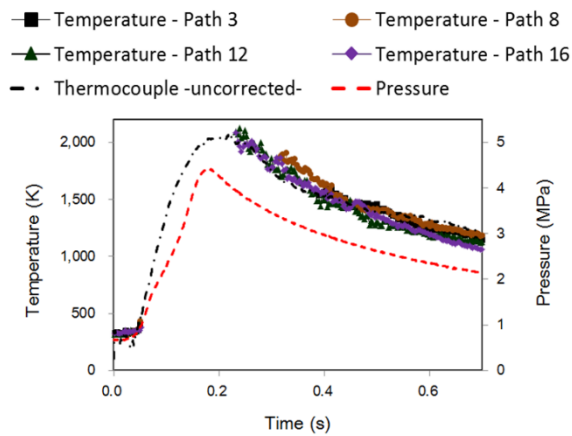
(b) 試験条件②



(c) 試験条件③

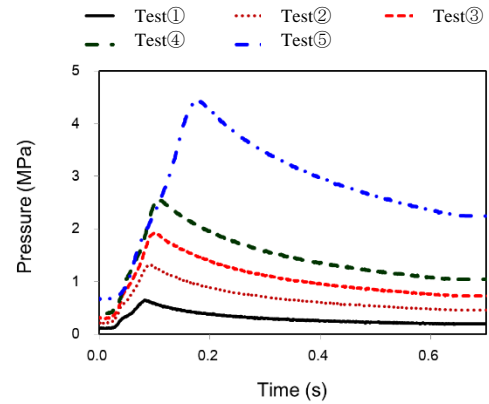
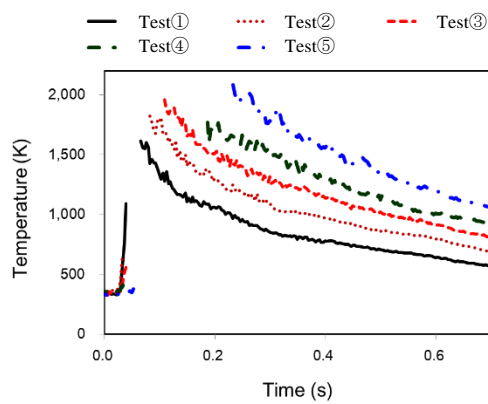


(d) 試験条件④



(e) 試験条件⑤

図 4.4.4-13 各試験条件において、CT 計測セルの各レーザパスで計測された時系列温度結果 (半導体レーザ吸収法_各レーザパス平均温度)と圧力・熱電対温度計測結果(輻射補正なし)



(a) 温度変化(半導体レーザ吸収法)

(b) 圧力変化(圧力センサ)

図 4.4.4-14 各試験条件において、CT 計測セルの各レーザパスで計測された
時系列温度結果と圧力センサ計測結果まとめ

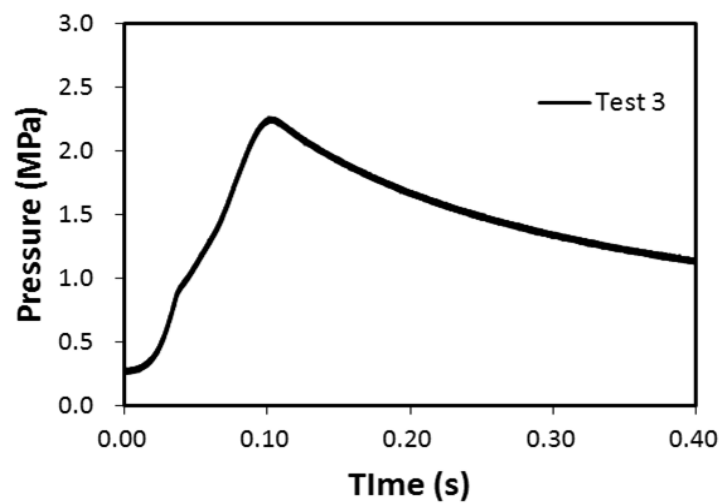


図 4.4.4-15 試験条件③における圧力波形

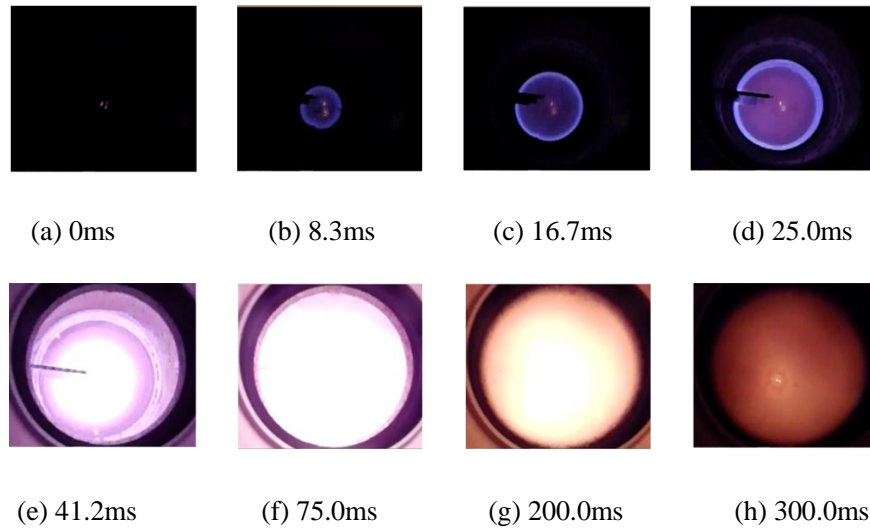


図 4.4.4-16 試験条件③における燃焼画像

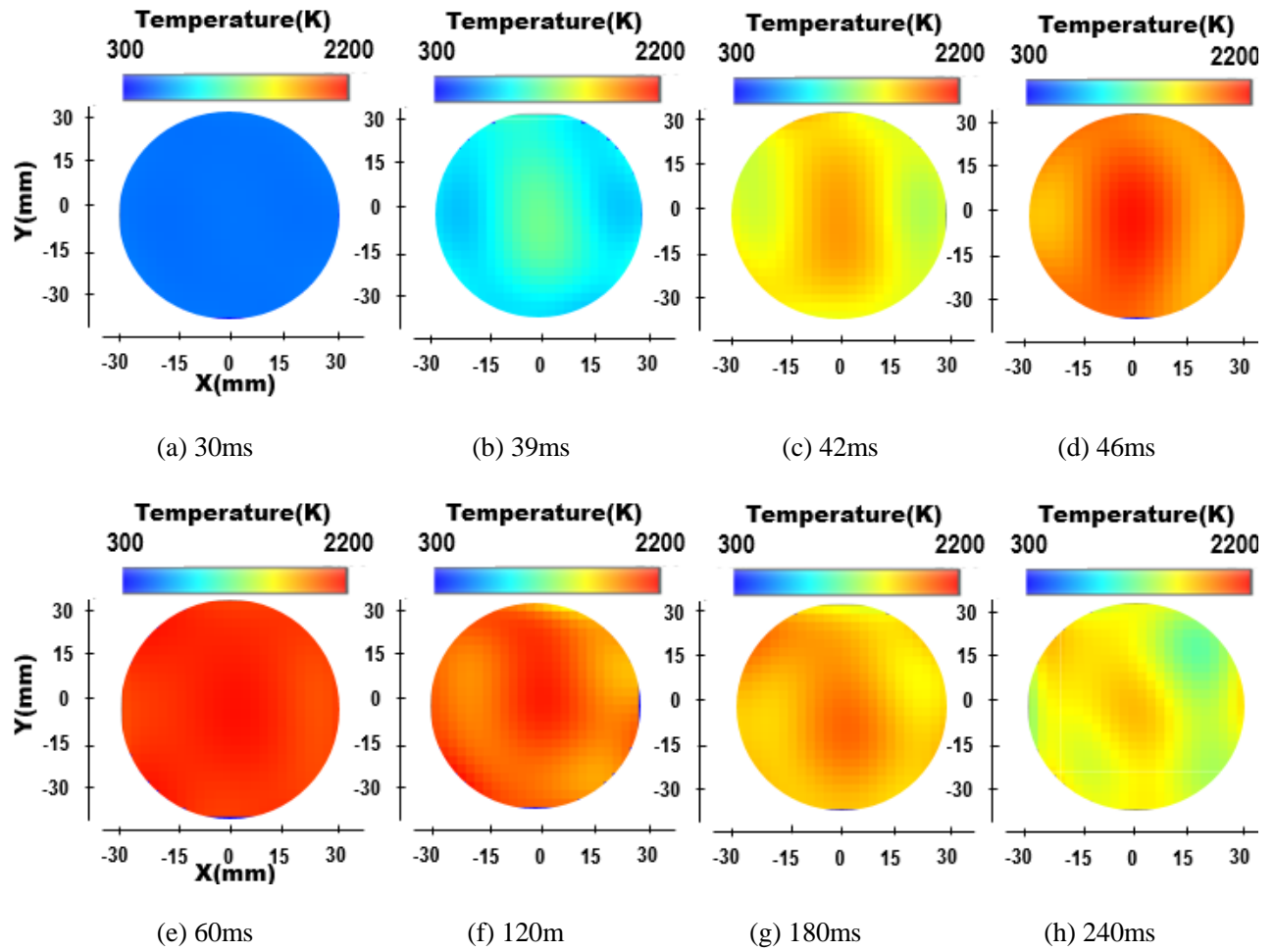
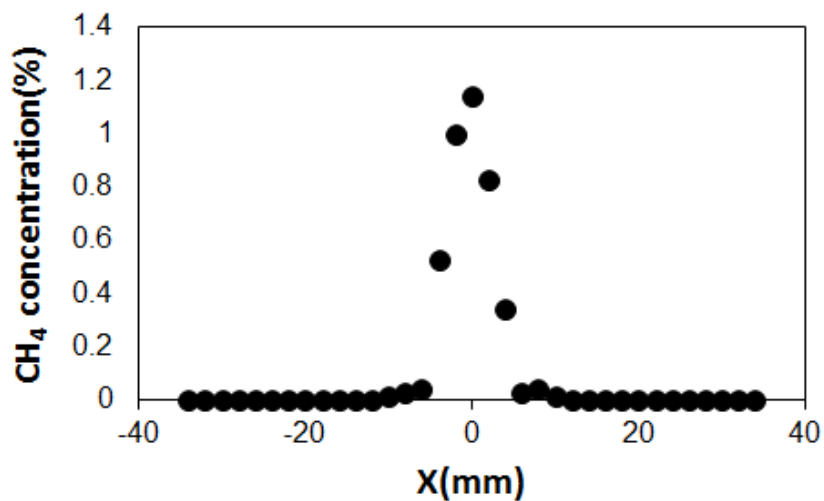


図 4.4.4-17 試験条件③における 2 次元温度分布結果

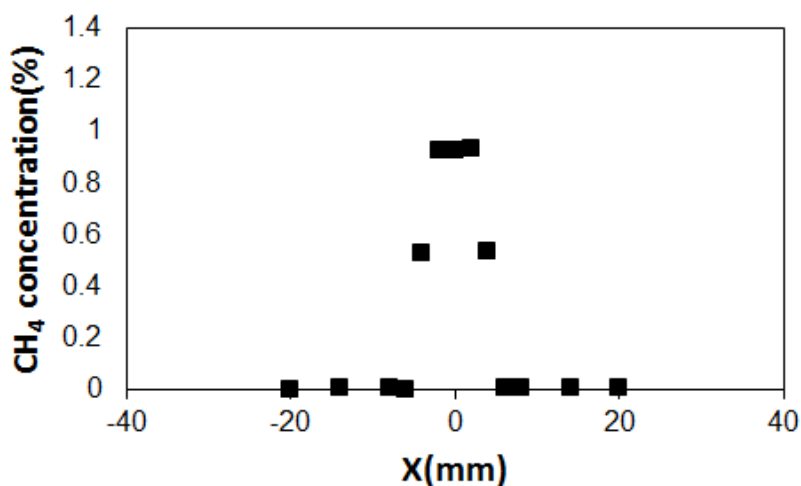
4.5 2次元濃度分布計測特性評価

4.5.1 精度検証

CT 半導体レーザー吸収法及びサンプリング法を用いて計測した、計測セル断面での CH_4 濃度を図 4.5.1-1 に示す。CT 半導体レーザー吸収法では、16 パスを用いた画像再構成結果において、 $Y=0\text{mm}$ の結果を示している。CT 半導体レーザー吸収法及びサンプリング法共に、 X が $\pm 4\text{mm}$ 以内の領域で CH_4 が検知されており、両測定方法の結果は良い一致を示している。なお、CT 半導体レーザー吸収法では、 $X=\pm 4\text{mm}$ における CH_4 濃度の急速な立ち上がりが検知できていない。これは用いたレーザーパス数が 16 であり空間分解能(3-4mm)の影響によるものである。



(a) CT 計測結果($Y=0\text{mm}$)



(b) サンプリング計測結果($Y=0\text{mm}$)

図 4.5.1-1 CT 法及びサンプリング法によるメタン濃度分布計測結果

4.5.2 2次元メタン分布の非定常計測

DDV バルブを用いてメタン流量を変動させ、CT 計測セルで火炎直前のメタン分布の非定常計測を行った。図 4.5.2-1, 図 4.5.2-2, 図 4.5.2-3 にメタン流量を 50Hz, 100Hz で変動させたときの火炎発光と CT 計測セルで計測した各レーザパスのメタン吸収スペクトルを示す。メタン噴射口上を通るパス 3, 8, 13, 14 でメタンの吸収スペクトルが現れ、その他のパスではメタンの吸収スペクトルは見られない。図 4.5.2-4 にメタン流量を 50Hz で変動させたときの火炎直前の 2 次元メタン濃度分布時系列結果を示す。火炎変動は確認できており、50Hz までは、メタン濃度で $\pm 20\%$ 程度の変化が計測された。また、図 4.5.2-5 に示すようにメタン流量を 100Hz で変動させて同様にメタン吸収スペクトルの計測を行い 10%程度の濃度変化並びに微小な火炎変動を確認できた。

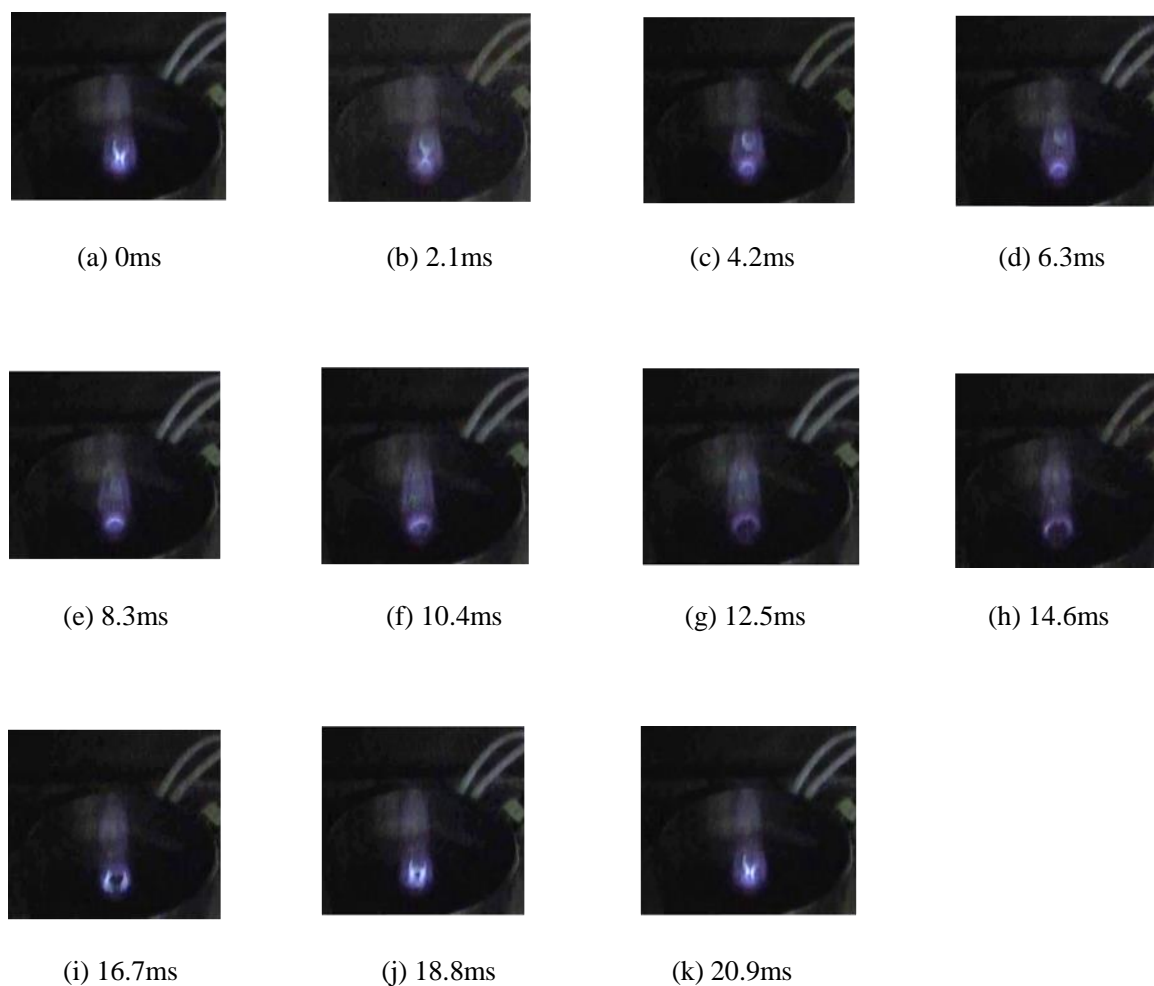
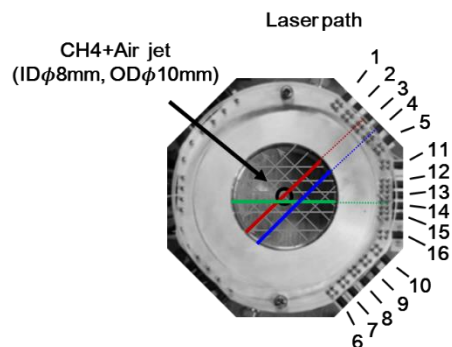


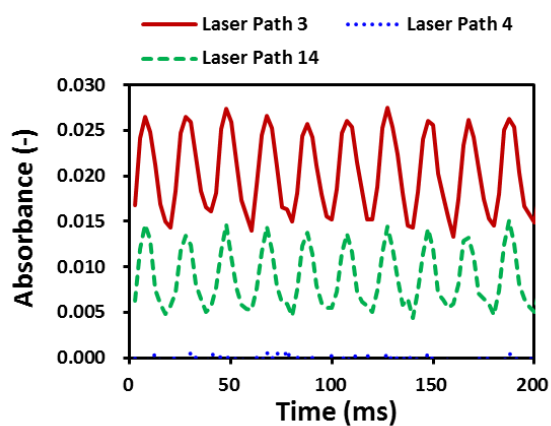
図 4.5.2-1 DDV バルブ 50Hz 時火炎発光時系列 (480fps で撮影)
(メタン平均 0.54L/min, 空気 3.6L/min, DDV バルブ周波数 50Hz, 周囲空気流量:20L/min, 室温:26.0℃, 46%RH)



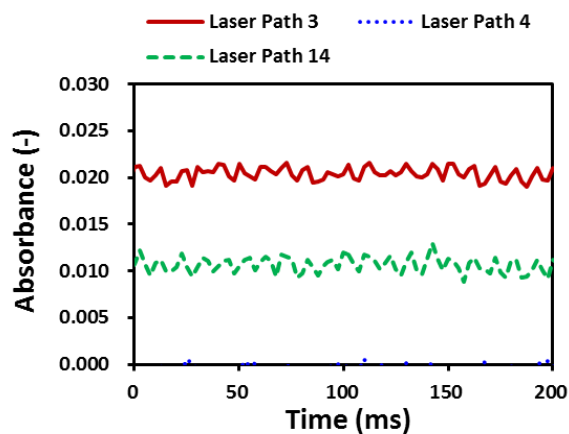
図 4.5.2-2 次元 DV バルブ周波数 100Hz 時火炎発光時系列 (480fps で撮影)
 (メタン平均 0.54L/min, 空気 3.6L/min, DDV バルブ周波数 100Hz, 周囲空気流量:20L/min, 室温:26.0℃, 46%RH)



(a) レーザパス 3, 4, 14 の配置



(b) DDV パルス周波数 50Hz におけるレーザパス 3,4,14 における吸光度の時系列データ



(c) DDV パルス周波数 100Hz におけるレーザパス 3,4,14 における吸光度の時系列データ

図 4.5.2-3 CT 計測セルを用いて計測したレーザパス 3,4,14 における吸光度の時系列データ
(レーザ周波数 1kHz, メタン平均 0.54L/min, 空気 3.6L/min, DDV パルス周波数 50,100Hz, 周囲空気流量:20L/min, 室温:26.0°C, 46%RH)

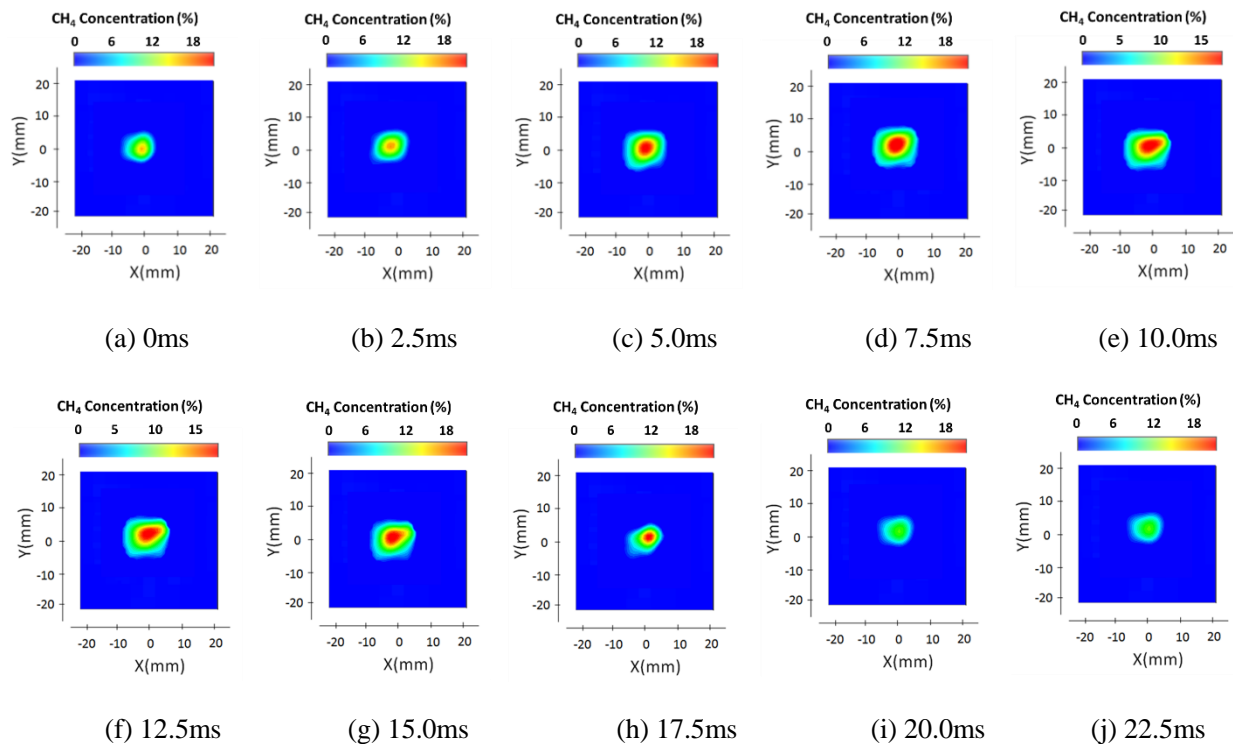


図 4.5.2-4 DDV バルブ 50Hz 時 2 次元メタン濃度分布(メタン平均 0.54L/min, 空気 3.6L/min, DDV バルブ周波数 50Hz, 周囲空気流量:20L/min, 室温:26.0℃, 46%RH)

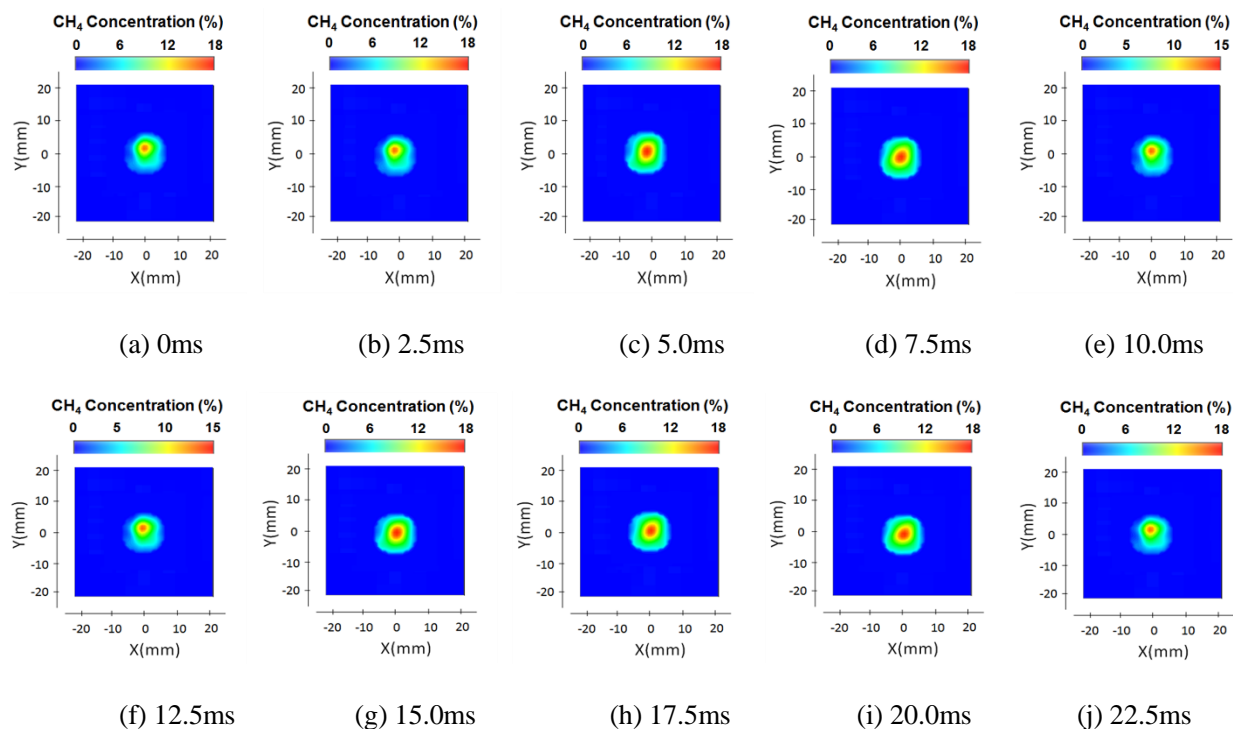
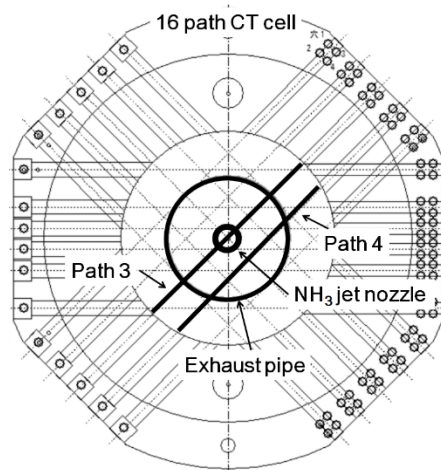


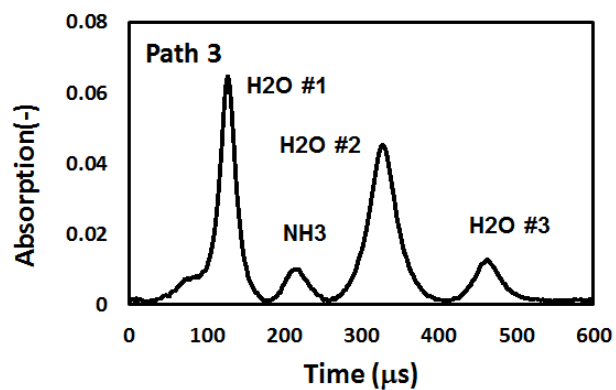
図 4.5.2-5 DDV バルブ 100Hz 時 2 次元メタン濃度分布(メタン平均 0.54L/min, 空気 3.6L/min, DDV バルブ周波数 100Hz, 周囲空気流量:20L/min, 室温:26.0℃, 46%RH)

4.5.3 エンジン排ガス内での 2 次元 NH₃ 計測

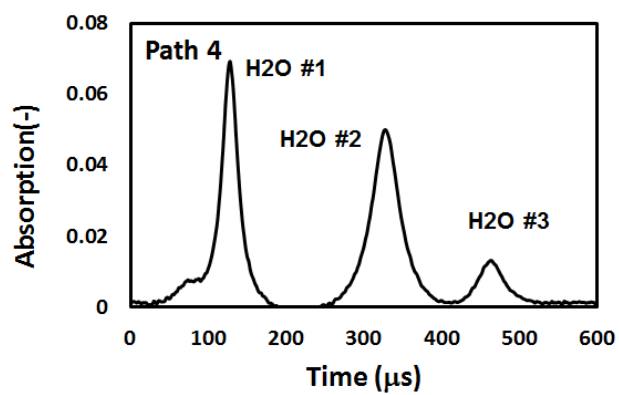
エンジン排ガスに NH₃ を添加し、計測セルにて計測を行った吸収スペクトル計測結果を図 4.5.3-1 に示す。1512nm 及び 1388nm の半導体レーザー光を合波しているため、1 波形中に NH₃ と H₂O のスペクトルが同時に計測できている。ここで、NH₃ の吸収スペクトルは 1512.23nm に、H₂O の #1, #2, #3 の吸収スペクトルは各々 1388.135nm, 1388.326nm, 1388.454nm に位置している。また、レーザーパス 3 は NH₃ 噴射管の中心部を、レーザーパス 4 は NH₃ 噴射管の中心から 8mm 離れた場所を通過している。NH₃ 用レーザー(1512nm 域)と H₂O 用レーザー(1388nm 域)を同時に使用した場合、H₂O の吸収スペクトルはレーザーパスの位置に関係なく全てのレーザーパスで計測でき、一方、NH₃ の吸収スペクトルは NH₃ が存在する領域を通過するレーザーパスのみに計測されている。このスペクトルを使用することにより、計測場全体の温度分布を求めることができ、この温度分布と NH₃ の吸収スペクトルから NH₃ の温度分布が算出可能となる。図 4.5.3-2 にエンジン排ガスに NH₃ を添加した場合のレーザーパス 3, 11, 13 における吸収強度の時間変化を、図 4.5.3-3 および図 4.5.3-4 に CT 計測を行った時系列 2 次元 NH₃ 濃度計測結果を示す。NH₃ の添加は、計測開始後 0.5 秒後から行い、6 秒後に添加を一時的にストップした。計測セルの中央部に高濃度域が存在し、中央部から 7mm 付近にかけて濃度は低下している。10mm 近辺以降、濃度はほぼ検出されていない。また、計測開始後 0.5 秒、6 秒での濃度変化を的確に捉えており、時系列 2 次元濃度計測が可能であることを実践できた。



(a) アンモニア噴射ノズルとレーザーパス 3,4 配置

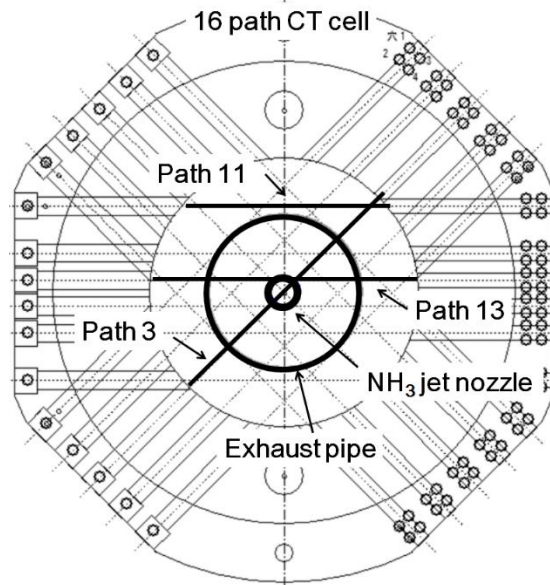


(b) レーザパス 3

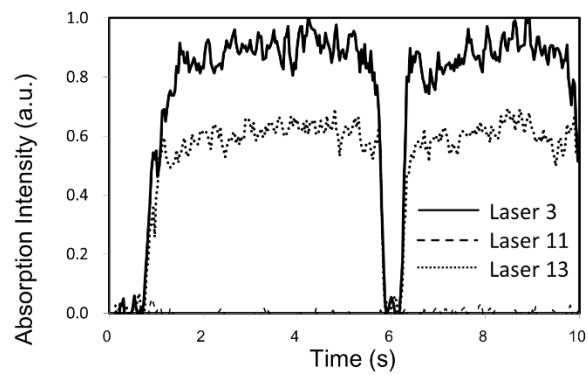


(c) レーザパス 4

図 4.5.3-1 水蒸気とアンモニア 吸収スペクトル同時計測



(a) アンモニア噴射ノズルとレーザパス 3, 11, 13 配置



(b) レーザパス 3, 11, 13 のアンモニア吸収量の時系列計測結果

図 4.5.3-2 アンモニア吸収量の時系列計測結果

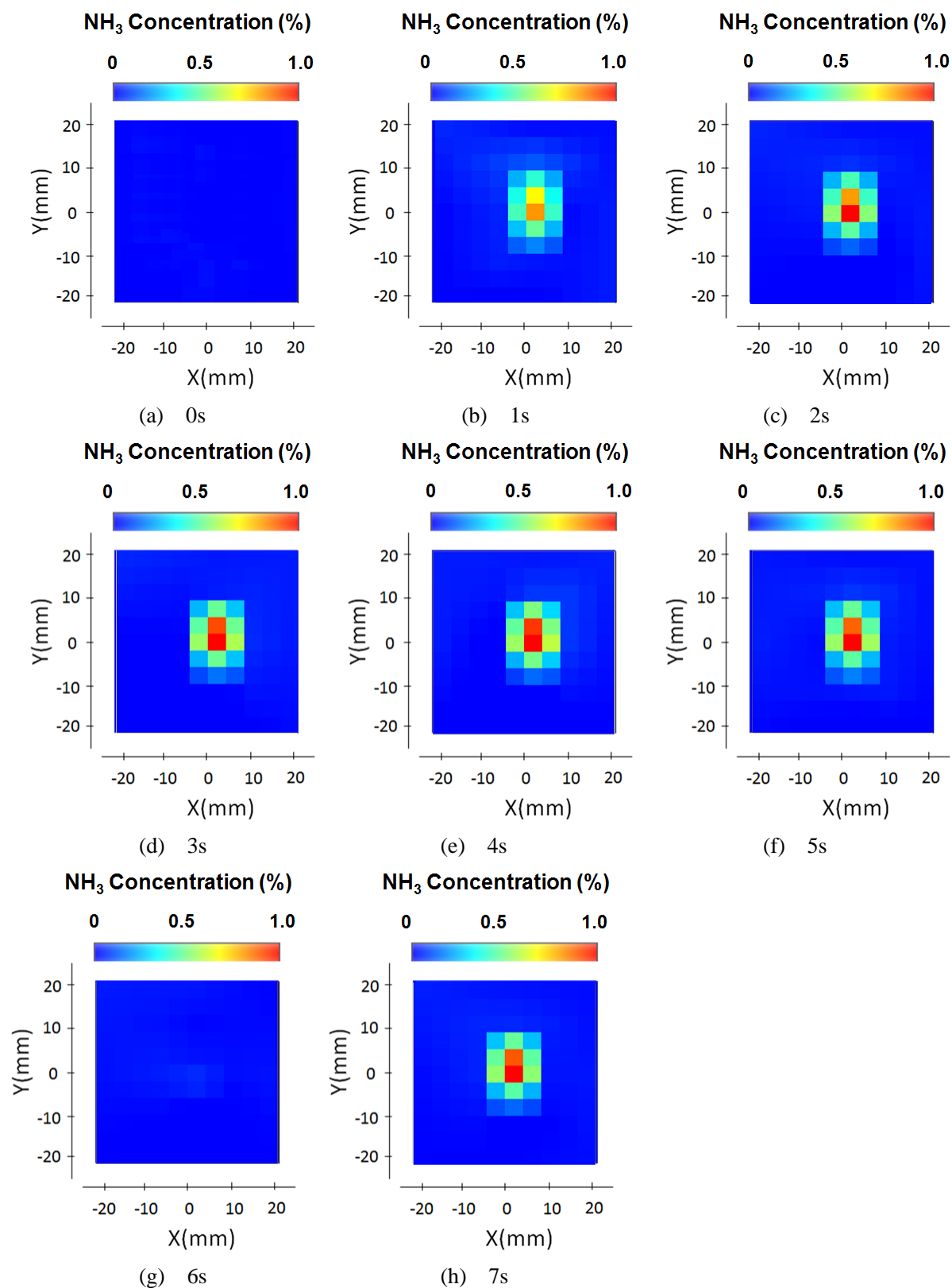


図 4.5.3-3 2次元アンモニア濃度分布時系列計測結果

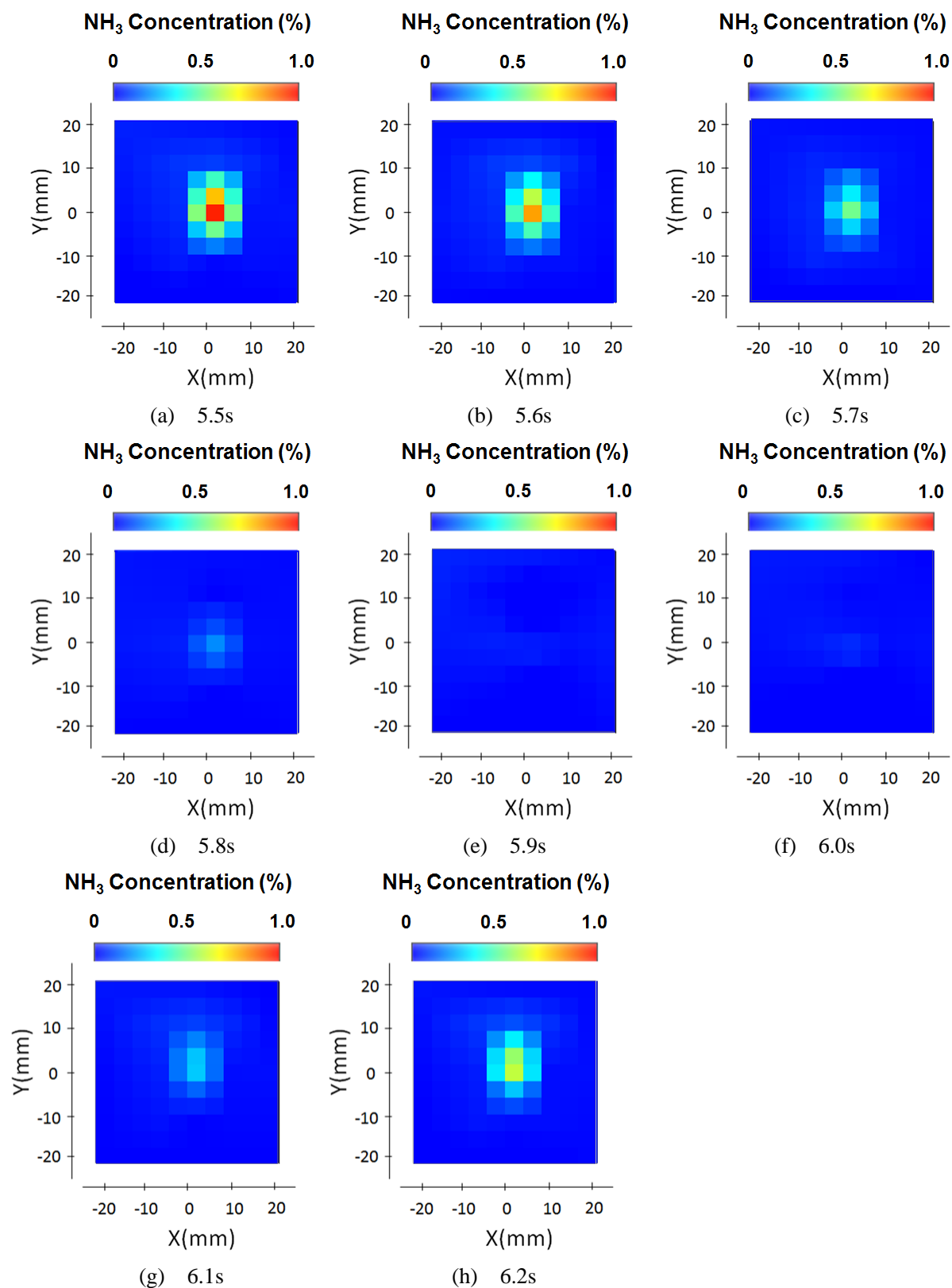
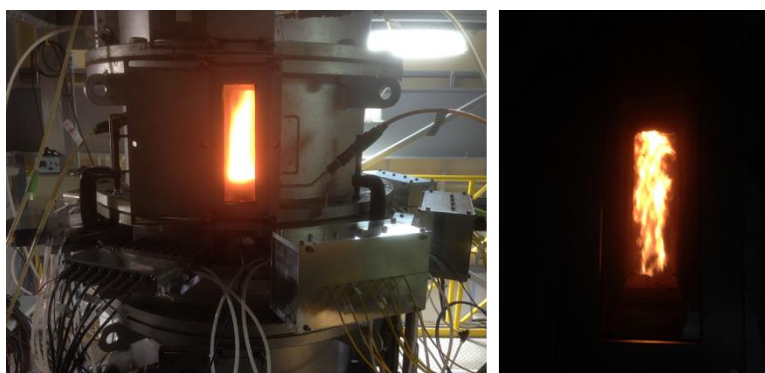


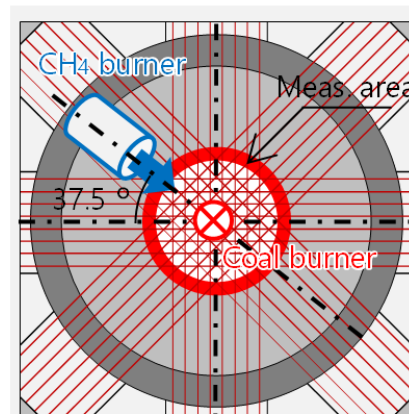
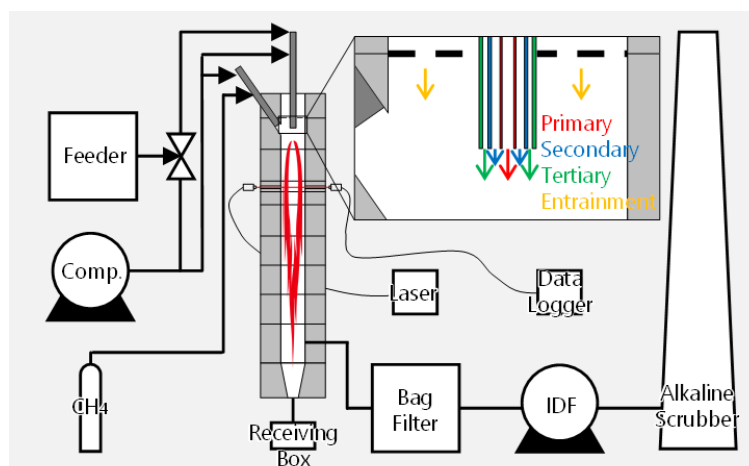
図 4.5.3-4 2次元アンモニア濃度分布時系列計測結果

4.6 開発用燃焼炉を用いた微粉炭燃焼場における2次元温度分布計測

電力中央研究所殿の図 4.6-1 に実験装置の概要を示す。また、表 4.6-1 に実験条件を示す。温度分布の変化を捉えるため、石炭供給量を変更した実験を行なった。本実験では、吸収スペクトル計測すると同時に、熱電対で壁面付近温度(8点)を計測した。熱電対の設置位置は図 4.6-2 に示す。表 4.6-2 に各ケースで計測できた熱電対温度を示す。図 4.6-3~図 4.6-5 に表 4.2.1 に示す各実験条件で 32 パス CT 計測セルを用いて計測された炉内 2 次元温度分布の平均温度、温度変動(標準偏差)を示す。これらによって、粉じんの多い微粉炭燃焼場において、2 次元温度分布の計測が可能であるということがわかる。図 4.6-4 と図 4.6-5 を比較すると、石炭供給量が多い Case1 のほうが投入熱量の増加などを理由に温度が高くなっており、また、石炭供給量の増加とともに空気流量も増加させたことによって、炉内の流速が早くなり、流れ場の乱れが強くなったため、温度変動も大きくなっている。図 4.6-6 に Case1 の二次元温度分布の時系列計測結果を示す。これより、二次元温度分布の時間変動を捉えていることがわかる。



(a) 写真



(b) 概要

図 4.6-1 実験装置概要

表 4.6-1 実験条件

		Case 0	Case 1	Case 2
Condition		CH4	CH4+Coal(3kg/h)	CH4+Coal(5kg/h)
Coal burner	Coal feed rate [kg/h]	-	3.0	5.0
	Primary air flow rate [L _N /min] @ 40°C		39	64
	Secondary air flow rate [L _N /min] @ 140°C		20	258
	Tertiary air flow rate [L _N /min] @ 410°C		138	
	Entrainment air flow rate [L _N /min] @ 480°C		198	
	Air-fuel ratio [-]		1.1	
CH ₄ burner	CH ₄ flow rate [L _N /min] @ 25°C	30.0		
	Air flow rate [L _N /min] @ 25°C	320.0		
Meas. cell	Purge N ₂ flow rate [L _N /min] @ 25°C	40.0		
Date/Time		2015/0902 13:50	2015/0902 20:07	2015/0902 19:36

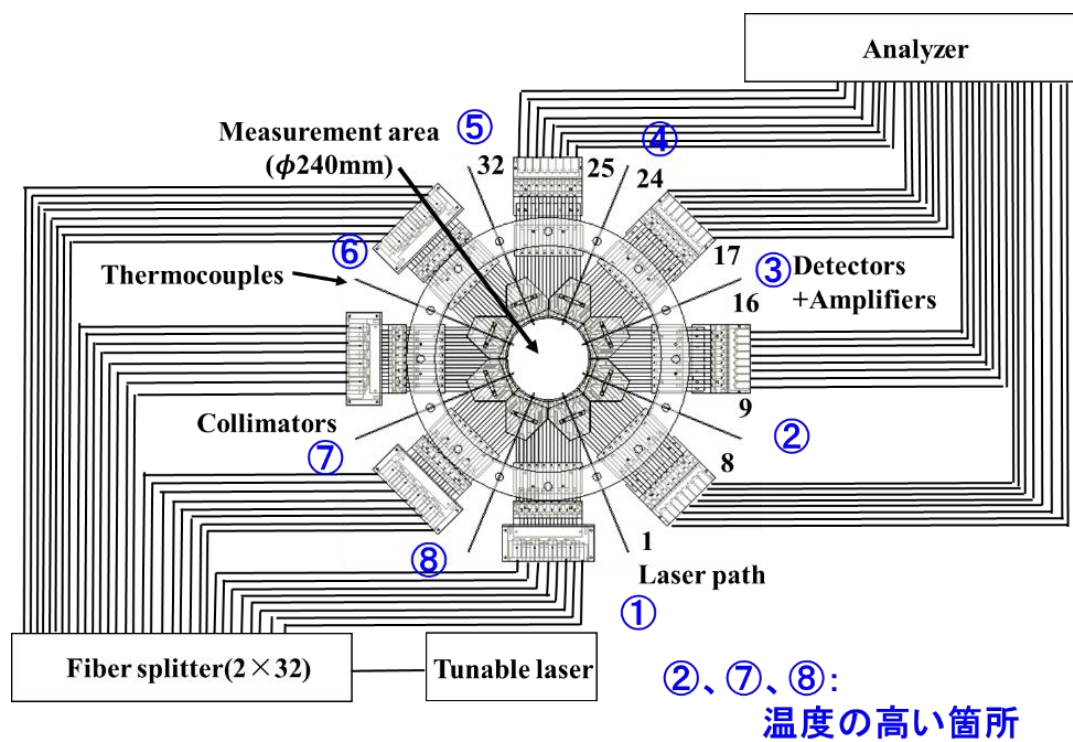
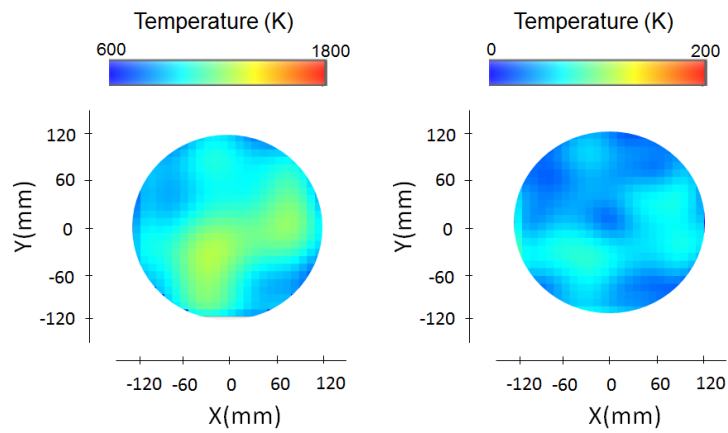


図 4.6-2 レーザパスとバーナおよび熱電対配置

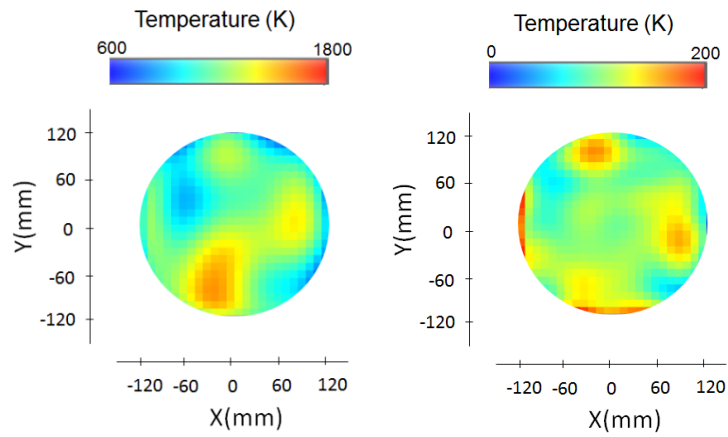
表 4.6-2 熱電対温度計測結果

	Thermocouple temperature (K)							
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
Case0	670							
Case1	886.3	936.1	911.7	852.8	848.4	832.7	924.2	924.0
Case2	770.1	869.3	844.5	795.9	771.4	748.3	830.1	822.9



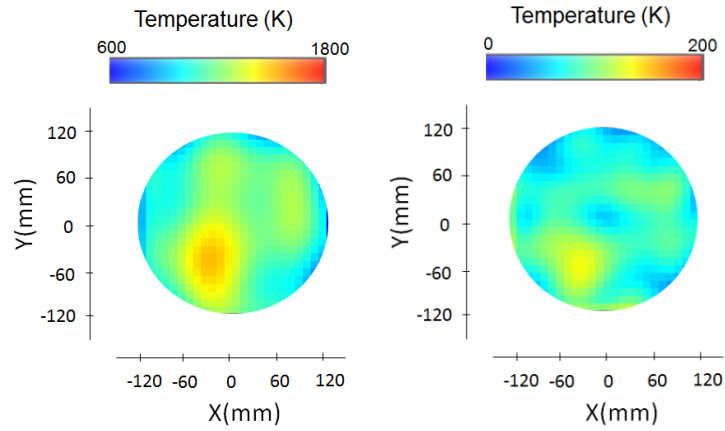
(a)平均温度 (b)温度変動(標準偏差)

図 4.6-3 Case0 における平均温度, 温度変動



(a)平均温度 (b)温度変動(標準偏差)

図 4.6-4 Case1 における平均温度, 温度変動



(a)平均温度 (b)温度変動(標準偏差)
図 4.6-5 Case2 における平均温度，温度変動

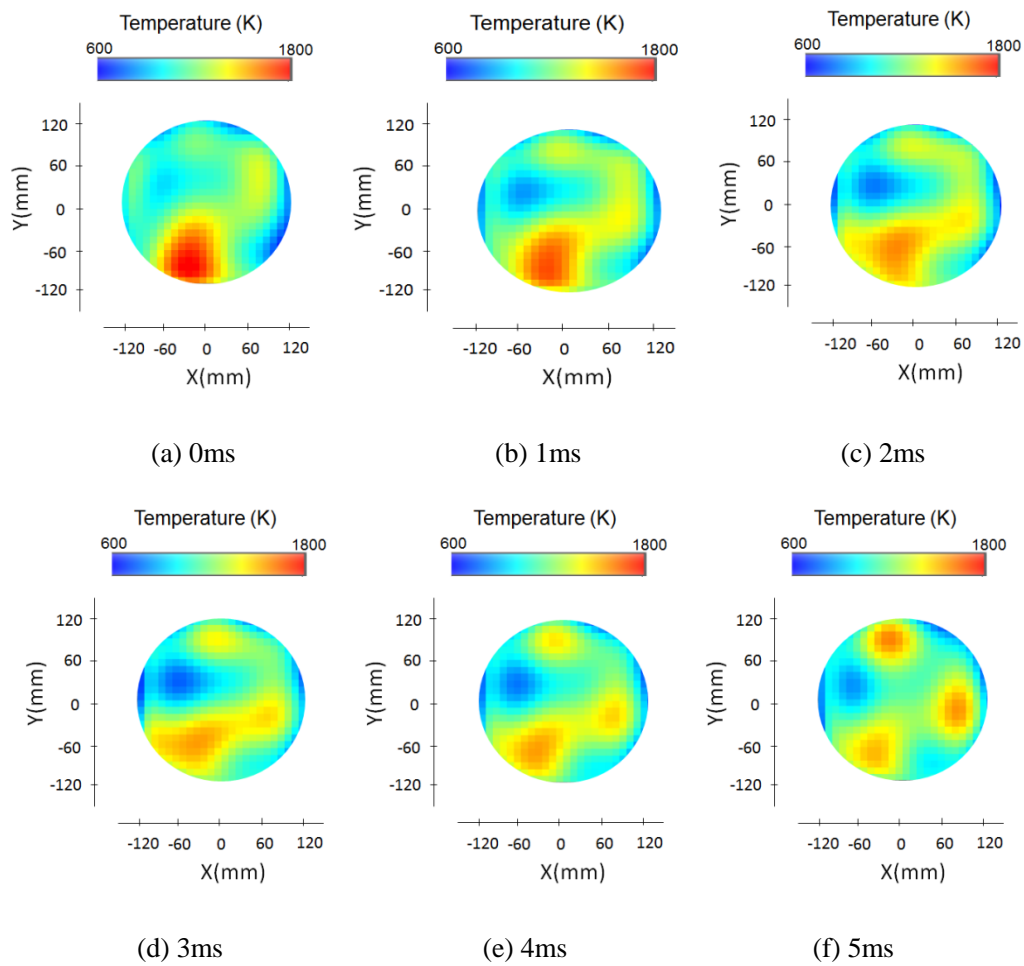


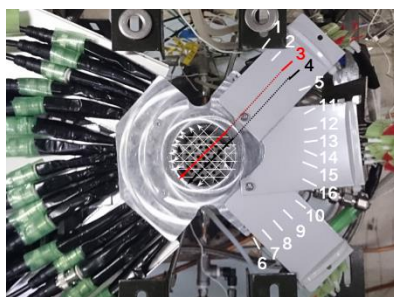
図 4.6-6 Case1 における 2 次元温度分布の時間変動

4.7 ガスタービン燃焼器モデルを用いた 2 次元メタン分布計測

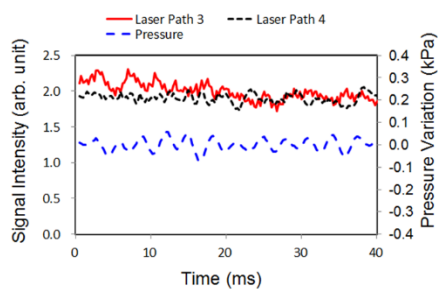
CT 計測セルを用いて火炎直前の 2 次元当量比分布の非定常計測を行った。表 4.7-1 に火炎直前の 2 次元当量比分布計測の試験条件を示す。図 4.3.1 に各試験条件において CT 計測セルを用いて計測した 3, 4 レーザパスのメタン吸収量の時系列結果と DLAS ライン近傍の圧力履歴を示す。図 4.7-2 に CT 計測セルと 2 次元当量比分布結果の配置を、図 4.7-3~図 4.7-9 に試験条件①~④の CT 計測セルで計測した 2 次元当量比分布を示す。図 4.7-10 に試験条件①~④において CT 計測セルを用いて計測した $Y=0\text{mm}$ での当量比分布を示す。各試験条件において DLAS ライン近傍の圧力変動に伴ったメタン吸収量変化を確認できた。試験条件①~④では 2 次元当量比分布を再構築できたが、試験条件⑤~⑦では計測値に問題があり、CT による 2 次元当量比分布の再構築ができなかった(誤差を規定値以下にする解が求められない)。圧力変動が大きいと、圧力変動に起因し CT 計測セルへのパージガスが変動し、その結果、影響を与える計測パスの光路距離が変動して吸収量に影響を及ぼす。このことは、圧力変動が大きい計測ケースにおいて、吸収量が圧力変動と同期して変動していることから確認できる(図 4.7-1 (f), (g)参照)。また、試験条件 7 の結果に関して、圧力変動は試験条件 6 (燃料噴射携帯が均一 $\lambda=0$) と同じレベルであり、吸収量の変動振幅がそれに比較して大きくなっていることから、圧力変動に起因する計測パスの吸収量の変動影響に加えて、当量比変動の影響もあると考えられる(図 4.7-1 (f), (g)参照)。

表 4.7-1 火炎直前の 2 次元当量比分布計測の試験条件

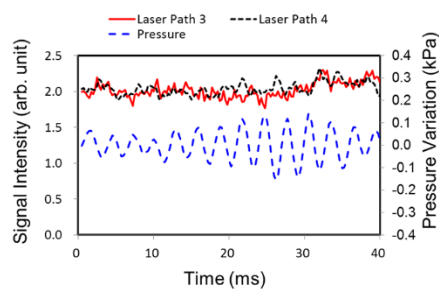
	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6	Test 7
Fuel split λ (%)	0	70			0		65
Total equivalence ratio	0.65	0.68	0.73	0.78	0.78	0.8	0.8
Corresponding flow rates of air (m^3/s)	0.0245	0.0255	0.0251	0.0205	0.0205	0.0200	0.0200
Bulk air flow rate (m/s)	12.5		10				
Methane upstream ($\times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$)	16.7	5.45	5.73	5.36	0	0	5.88
Methane downstream ($\times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$)	0	12.7	13.4	11.7	16.8	16.8	19.3



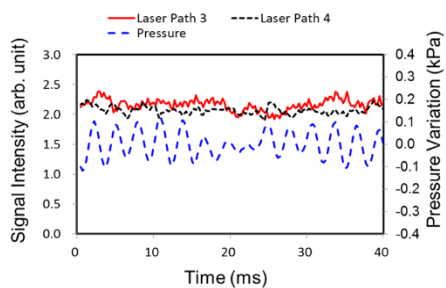
(a) レーザパス配置



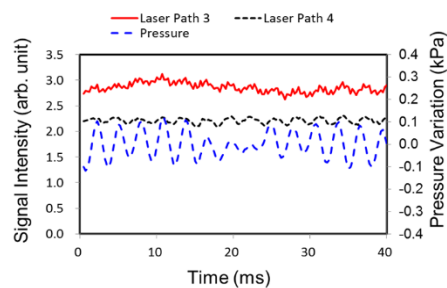
(b) 試験条件 2



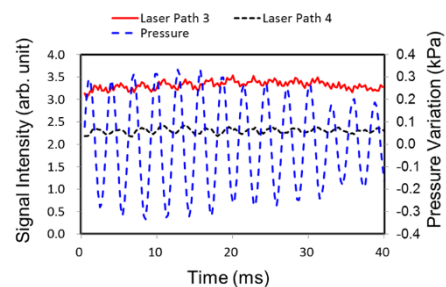
(c) 試験条件 3



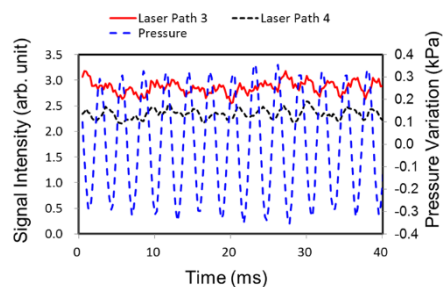
(d) 試験条件 4



(e) 試験条件 5



(f) 試験条件 6



(g) 試験条件 7

図 4.7-1 各試験条件において CT 計測セルを用いて計測した 3, 4 レーザパスのメタン吸収量の時系列結果と DLAS ライン近傍の圧力履歴

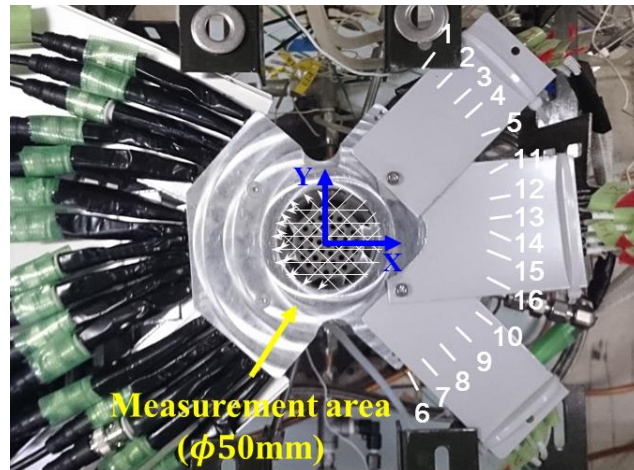


図 4.7-2 CT 計測セルと 2 次元当量比分布結果の配置

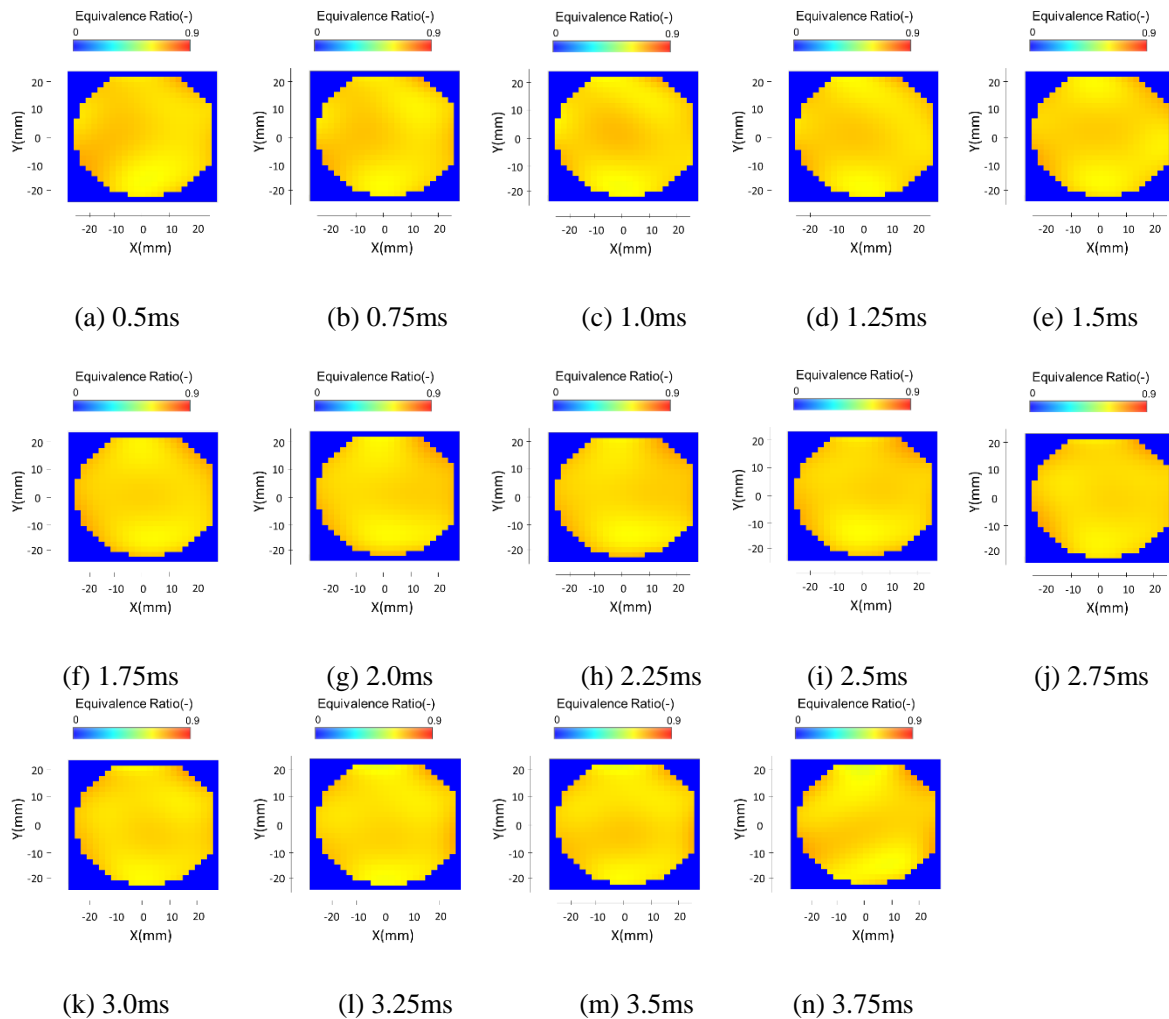


図 4.7-3 試験条件①において CT 計測セルを用いて計測した 2 次元当量比分布の時系列結果
(Equivalence ratio=0.65 定常時)

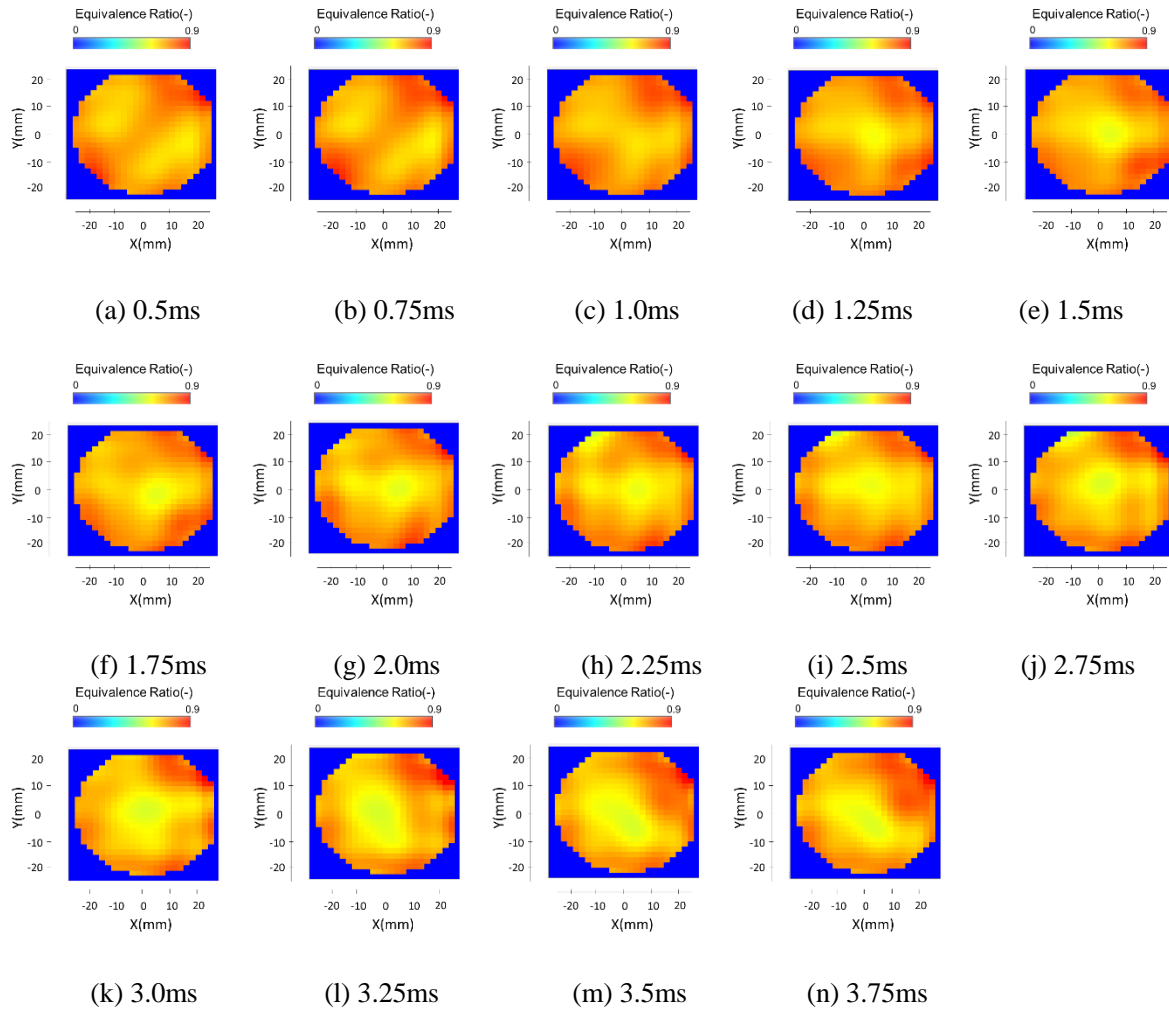


図 4.7-4 試験条件②において CT 計測セルを用いて計測した
2次元当量比分布の時系列結果_当量比表示 0-0.9

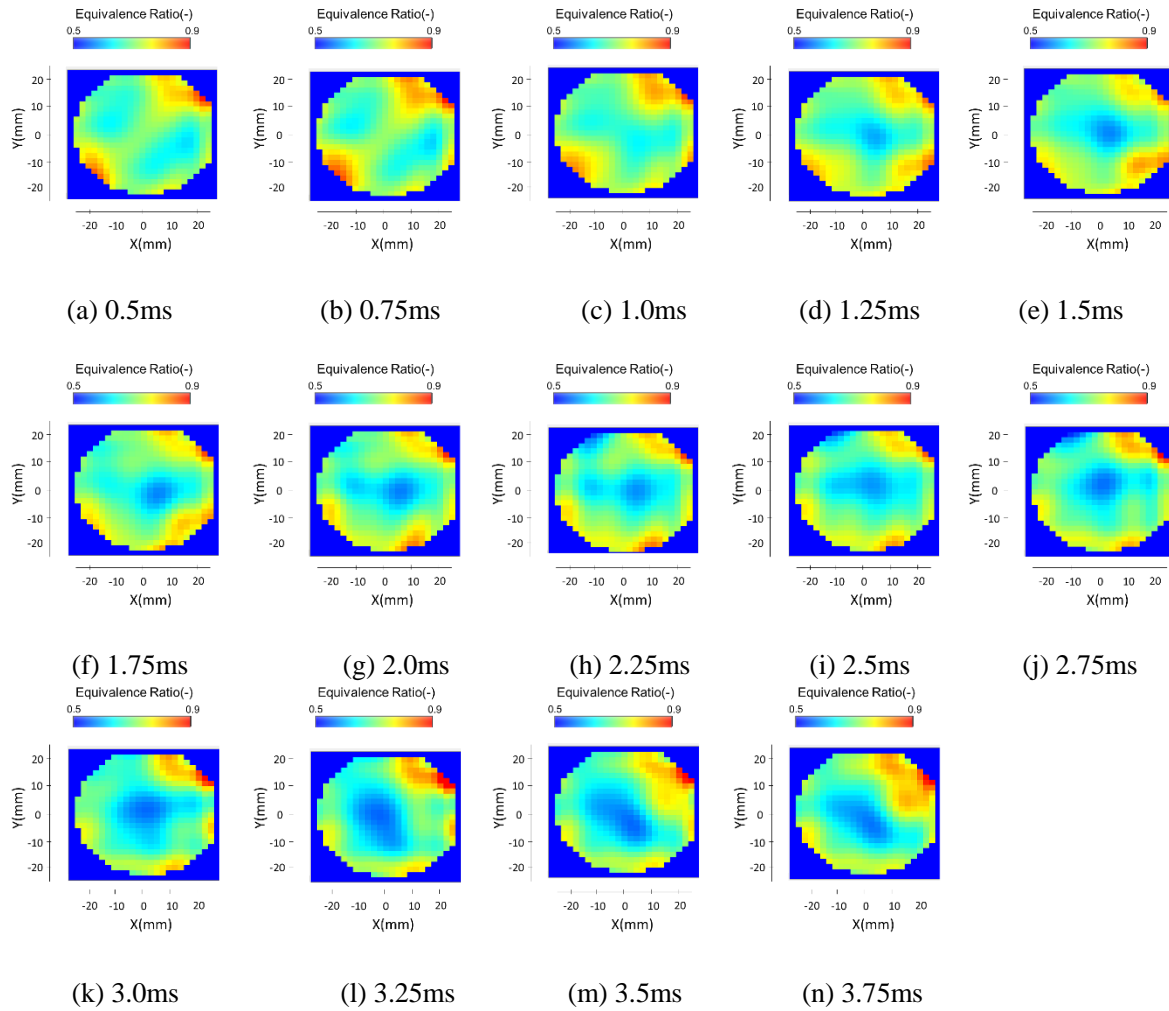


図 4.7-5 試験条件②において CT 計測セルを用いて計測した
2次元当量比分布の時系列結果_当量比表示 0.5-0.9

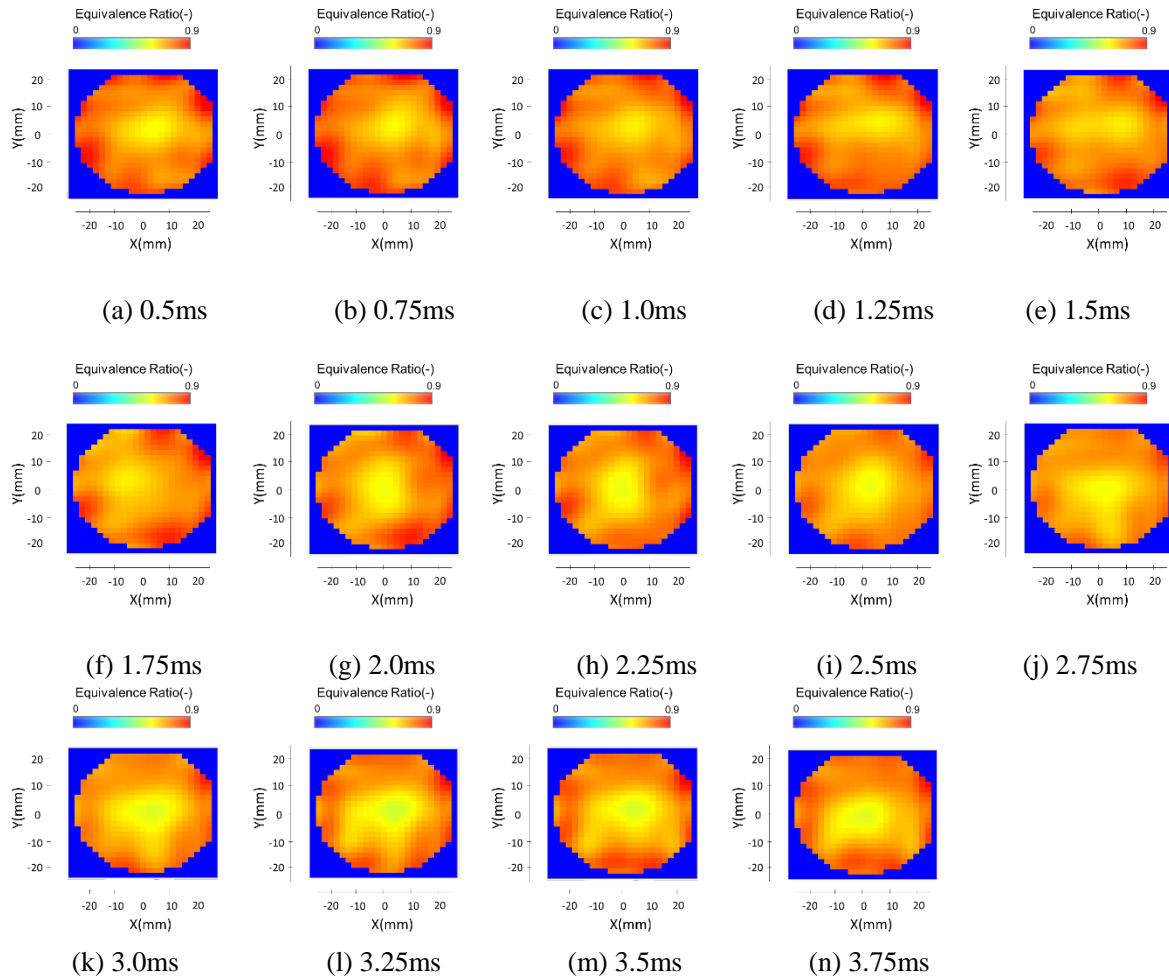


図 4.7-6 試験条件③において CT 計測セルを用いて計測した
2次元当量比分布の時系列結果_当量比表示 0-0.9

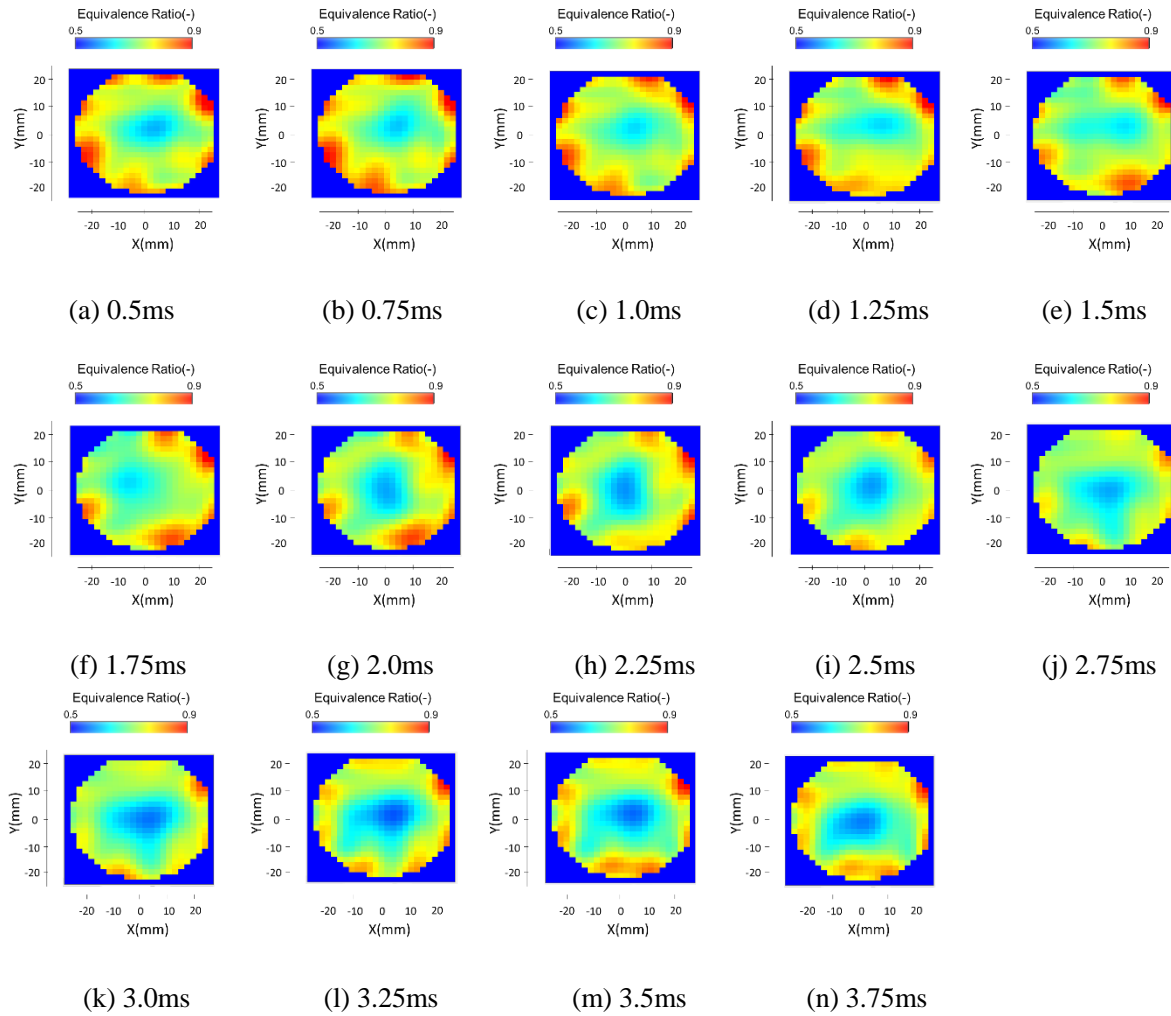


図 4.7-7 試験条件③において CT 計測セルを用いて計測した
2次元当量比分布の時系列結果_当量比表示 0.5-0.9

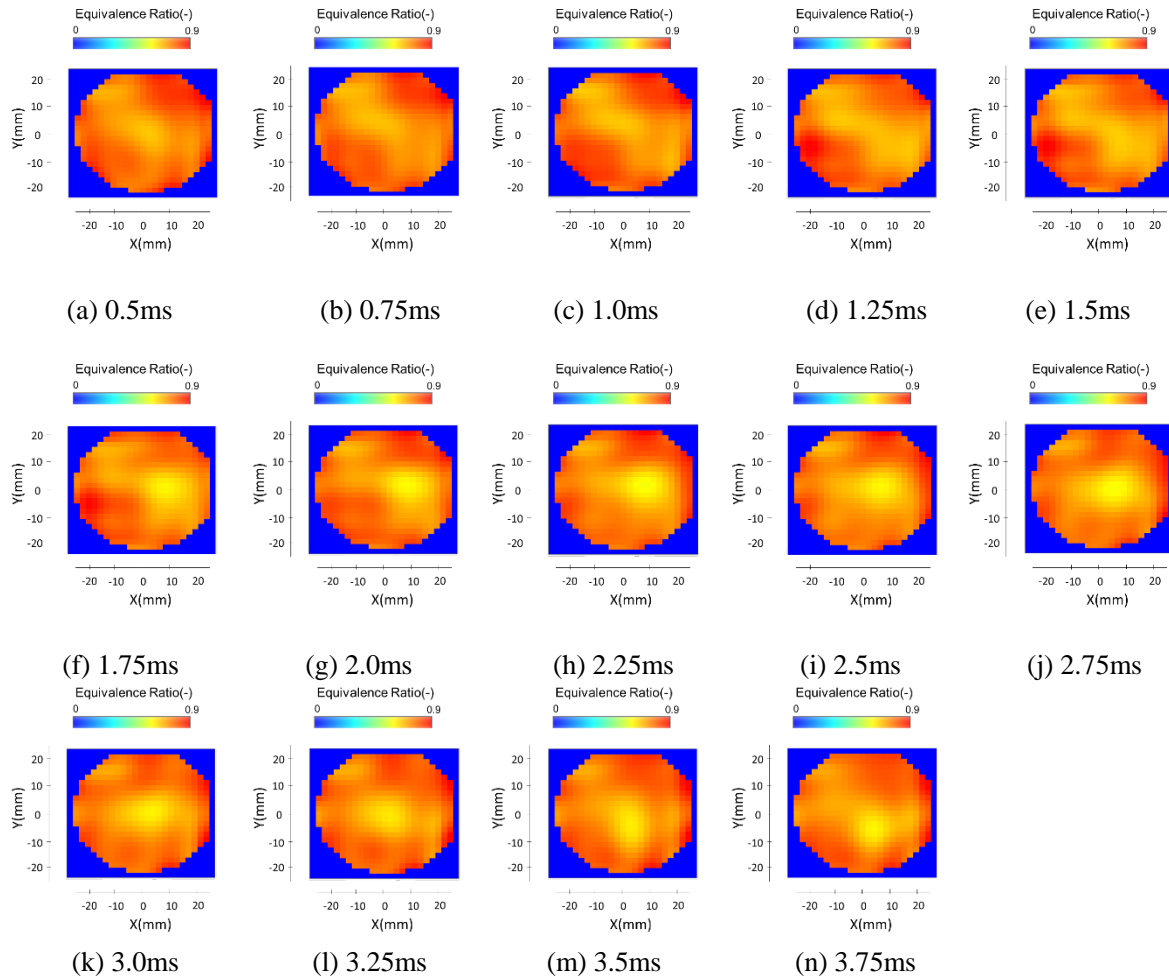


図 4.7-8 試験条件④において CT 計測セルを用いて計測した
2次元当量比分布の時系列結果_当量比表示 0-0.9

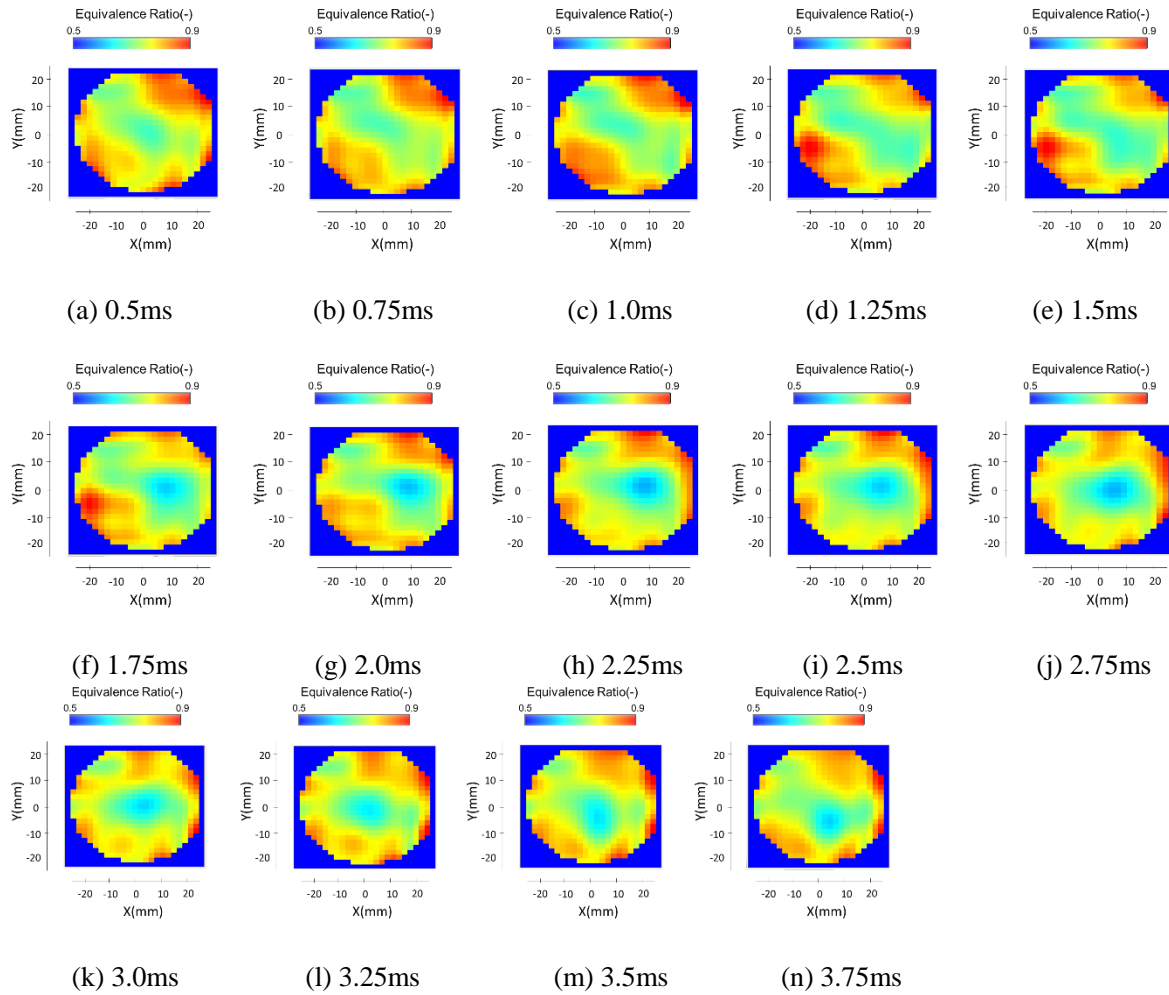


図 4.7-9 試験条件④において CT 計測セルを用いて計測した
2次元当量比分布の時系列結果_当量比表示 0.5-0.9

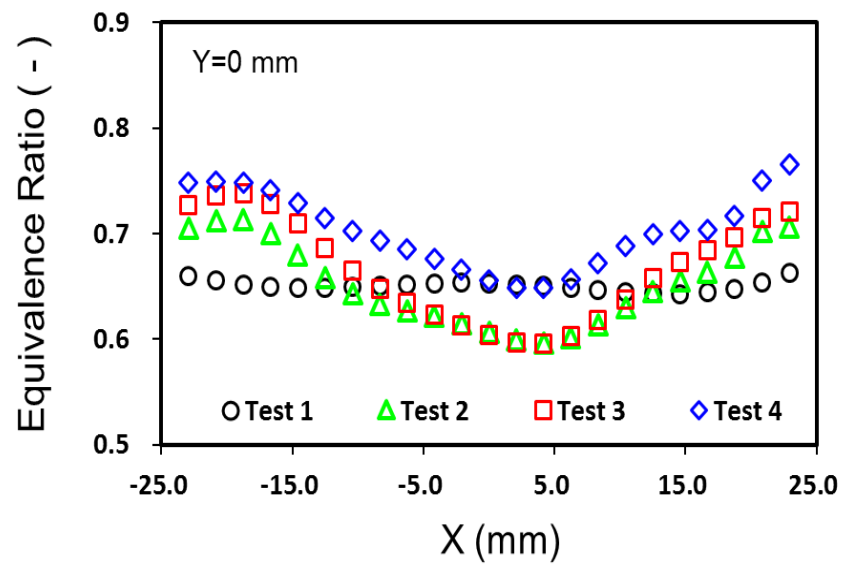


図 4.7-10 試験条件①～④において CT 計測セルを用いて計測した
Y=0mm での当量比分布

第5章 結言

半導体レーザ吸収法と CT を組合せることにより 2 次元・3 次元濃度・温度分布を計測できる技術を開発し、この技術を、エンジン、ボイラ、ガスタービンなどの各種燃焼機器、化学反応を伴う化学プロセスに応用展開するための試験を実施した。2 次元・3 次元濃度・温度分布計測では、データベースの充実、CT 計測セル構造、計測精度の明確化が重要な開発課題となるが、開発に必要なデータベースを構築し、その各種基礎試験装置を用いた検証試験を実施し、以下の結果を得た。

- 1) 16 パス半導体レーザ光吸収を用い、エンジン排ガスにおけるリアルタイム 2 次元温度計測が可能であることを実証した。また、バーナにて、計測領域の温度分布を CT 半導体レーザ吸収法及び熱電対で計測し、両者の結果は良い一致を示した。
- 2) 16 パス CT 計測セルを用いて燃焼振動時における火炎直前の 2 次元メタン分布の非定常計測を行い、燃焼場の圧力変動に応じた 2 次元メタン分布の変動を捉えることができた。
- 3) 空間分解能はレーザパス数に依存し、温度分布としては、CT 解析領域の平均値となる。レーザパス上の各点に関して温度、濃度の内挿を行うことにより、空間分解能、精度を改善することが可能となる。
- 4) CT 解析において、初期値の温度、水蒸気濃度分布の選定は、解析の収束性、意味ある解析解を求める上で重要であり、温度依存性の異なる複数の吸収線を用いることは解析の安定性を向上する上で有効である。
- 5) CT 半導体レーザ吸収法をガスタービン燃焼器モデルに適用し、16 パス CT 計測セルを用いて燃焼振動時における火炎直前の 2 次元メタン分布の非定常計測を行い、燃焼場の圧力変動に応じた 2 次元メタン分布の変動を捉えることができた。
- 6) CT-半導体レーザ吸収法を用いて、粉じんの多い微粉炭燃焼場において、2 次元温度分布を取得したことにより、本計測法の有用性を実証した。
- 7) 高温場(1000-2000K)やエンジン筒内のような高圧場への適用では、計測する温度依存性の異なる複数の吸収線の選定や、レーザ波長の波長掃引幅の拡大などが重要となる。

参考文献

- [1] Deguchi, Y., Industrial applications of Laser Diagnostics, *New York, CRS Press: Taylor & Francis* 2011.
- [2] Ax, H., Stopper, U., Meier, W., Aigner, M., and uthe, F.G., (2010). Experimental Analysis of the Combustion Behavior of a Gas Turbine Burner by Laser Measurement Techniques. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 132, 051503, pp.1-9. (doi:[10.1115/1.3205033](https://doi.org/10.1115/1.3205033))
- [3] Braeuer, A., and Leipertz, A., (2009). Two-dimensional Raman mole-fraction and temperature measurements for hydrogen-nitrogen mixture analysis. *Applies optics*, Vol.48, No.4, pp.B57-B64. (doi: [10.1364/AO.48.000B57](https://doi.org/10.1364/AO.48.000B57))
- [4] Jehlickaa, J., Viteka, P., Edwardsb, H.G.M., Heagravesb, M., and Capounc, T., (2009). Application of portable Raman instruments for fast and non-destructive detection of minerals on outcrops. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, Vol. 73, No. 3, pp. 410–419. (doi: [10.1016/j.saa.2008.09.004](https://doi.org/10.1016/j.saa.2008.09.004))
- [5] Tiwari, V.S., Kalluru, R.R., Yueh, F.Y., Singh, J.P., Cyr, W.St., and Khijwania, S.K., (2007). Fiber optic Raman sensor to monitor the concentration ratio of nitrogen and oxygen in a cryogenic mixture. *Applied optics*, Vol. 46, No. 16, pp.3345-3351.(doi: [10.1364/AO.46.003345](https://doi.org/10.1364/AO.46.003345))
- [6] Engel, S.R., Koch, P., Braeuer, A., and Leipertz, A., (2009). Simultaneous laser-induced fluorescence and Raman imaging inside a hydrogen engine. *Applied optics*, Vol. 48, No. 35, pp.6643-6650.(doi: [10.1364/AO.48.006643](https://doi.org/10.1364/AO.48.006643))
- [7] Williams, B., Ewart, P., Wang, X., Stone, R., Ma, H., Walmsley, H., Cracknell, R., Stevens, R., Richardson, D., Fu, H., and Wallace, S., (2010). Quantitative planar laser-induced fluorescence imaging of multi-component fuel/air mixing in a firing gasoline-direct-injection engine: Effects of residual exhaust gas on quantitative PLIF. *Combustion and Flame*, Vol. 157, No. 10, pp. 1866–1878.(doi: [10.1016/j.combustflame.2010.06.004](https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2010.06.004))
- [8] Luong, M., Zhang, R., Schulz, C., and Sick, V., (2008). Toluene laser-induced fluorescence for in-cylinder temperature imaging in internal combustion engines. *Appl. Phys. B* 91, pp.669–675.(DOI: [10.1007/s00340-008-2995-5](https://doi.org/10.1007/s00340-008-2995-5))
- [9] Lachaux, T., and Musculus, M. P.B., (2007). In-cylinder unburned hydrocarbon visualization during low-temperature compression-ignition engine combustion using formaldehyde PLIF. *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 31, No. 2, pp. 2921–2929.(doi: [10.1016/j.proci.2006.07.044](https://doi.org/10.1016/j.proci.2006.07.044))
- [10] Smith, J.D., and Sick, V., (2007). Quantitative, dynamic fuel distribution measurements in combustion-related devices using laser-induced fluorescence imaging of biacetyl in iso-octane, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 31, No. 1, pp. 747–755.(doi: [10.1016/j.proci.2006.07.049](https://doi.org/10.1016/j.proci.2006.07.049))

- [11] Kim, T., and Ghandhi, J.B., (2005). Investigation of light load HCCI combustion using formaldehyde planar laser-induced fluorescence. *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 30, No. 2, pp. 2675–2682.(doi: [10.1016/j.proci.2004.08.147](https://doi.org/10.1016/j.proci.2004.08.147))
- [12] Bessler, W.G., Hofmann, M., Zimmermann, F., Suck, G., Jakobs, J., Nicklitzsch, S., Lee, T., Wolfrum, J., and Schulz, C., (2005). Quantitative in-cylinder NO-LIF imaging in a realistic gasoline engine with spray-guided direct injection. *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 30, No. 2, pp. 2667–2674.(doi: [10.1016/j.proci.2004.08.123](https://doi.org/10.1016/j.proci.2004.08.123))
- [13] Hou, H.M., Tian, Y., Li, Y., and Zheng, R.E., (2014). Study of pressure effects on laser induced plasma in bulk seawater. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, Vol.29, No. 1, pp.169-175. (doi: [10.1039/C3JA50244A](https://doi.org/10.1039/C3JA50244A))
- [14] Sun, D.X., Su, M.G., Dong, C.Z., and Wen, G.H., (2014). A comparative study of the laser induced breakdown spectroscopy in single- and collinear double-pulse laser geometry. *Plasma Science and Technology*, Vol.16, No. 4, pp. 374-379. (doi: <http://dx.doi.org/10.1088/1009-0630/16/4/13>)
- [15] Wan, X., and Wang, P., (2014). Remote Quantitative Analysis of Minerals Based on Multispectral Line-Calibrated Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS). *Applied spectroscopy*, Vol.68, No. 10, pp. 1132-1136. (doi: [10.1039/C3JA50244A](https://doi.org/10.1039/C3JA50244A))
- [16] Zhang, X.B., Deguchi, Y., Wang, Z.Z., Yan, J.J., Liu, and J.P., (2014). Sensitive detection of iodine by low pressure and short pulse laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS). *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, Vol.29, No. 6, pp. 1082-1089. (doi: [10.1039/C4JA00044G](https://doi.org/10.1039/C4JA00044G))
- [17] Wang, Z.Z., Deguchi, Y., Kuwahara, M., Zhang, X.B., Yan, J.J., and Liu, J.P., (2014). Sensitive measurement of trace mercury using low pressure laser-induced plasma. *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.52, No. 11S, pp. NC05 -1-6. (doi: <http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.52.11NC05>)
- [18] Wang, Z.Z., Deguchi, Y., Kuwahara, M., Yan, J.J., and Liu, J.P., (2013). Enhancement of laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) detection limit using a low-pressure and short-pulse laser-induced plasma process. *Applied Spectroscopy*, Vol.67, No. 11, pp. 1242-1251. (doi: [10.1366/13-07131](https://doi.org/10.1366/13-07131))
- [19] Li, X.W., Wang, Z., Lui, S.L., Fu, Y.T., Li, Z., Liu, J.M., Ni, and W.D., (2013). A partial least squares based spectrum normalization method for uncertainty reduction for laser-induced breakdown spectroscopy measurements. *Spectrochimica Acta Part B-Atomic Spectroscopy*, Vol.88, pp. 180-185. (doi: [10.1016/j.sab.2013.07.005](https://doi.org/10.1016/j.sab.2013.07.005))
- [20] Hou, Z.Y., Wang, Z., Liu, J.M., Ni, W.D., and Li, Z., (2013). Signal quality improvement using cylindrical confinement for laser induced breakdown spectroscopy. *Optics Express*, Vol.21, No. 13, pp. 15974-15979. (doi: [10.1364/OE.21.015974](https://doi.org/10.1364/OE.21.015974))
- [21] Zhou, W.D., Su, X.J., Qian, H.G., Li, K.X., Li, X.F., Yu, Y.L., and Ren, Z.J., (2013). Discharge character and optical emission in a laser ablation nanosecond discharge enhanced silicon plasma. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, Vol.28, No. 5, pp. 702-710. (doi: [10.1039/C3JA30355A](https://doi.org/10.1039/C3JA30355A))

- [22] Guo, L.B., Li, C.M., Hu, W., Zhou, Y.S., Zhang, B.Y., Cai, Z.X., Zeng, X.Y., and Lu, Y.F., (2013). Plasma confinement by hemispherical cavity in laser-induced breakdown spectroscopy. *Applied Physics Letters*, Vol.98, No. 13, pp. 131501-1-131501-3. (doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3573807>)
- [23] Miziolek, A.W., Palleschi, V., and Schechter, I., Laser Induced Breakdown Spectroscopy. *Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom* 2008.
- [24] Yaroshchyk, P., Morrison, R.J.S., Body, D., and Chadwick, B.L., (2005). Quantitative determination of wear metals in engine oils using LIBS: The use of paper substrates and a comparison between single- and double-pulse LIBS. *Spectrochimica Acta Part B-Atomic Spectroscopy*, Vol.60, No. 11, pp. 1482-1485. (doi: [doi:10.1016/j.sab.2005.09.002](https://doi.org/10.1016/j.sab.2005.09.002))
- [25] Eckbreth, A.C., Laser diagnostics for combustion temperature and species, Cambridge, Mass., ABACUS Press 1988.
- [26] Allen, M.G., Carleton, K.L., Davis, S.J., Kessler, W.J., Otis, C.E., Palombo, D.A., and Sonnenfroh, D.M., (1995). Ultrasensitive dual-beam absorption and gain spectroscopy: Applications for near-infrared and visible diode laser sensors. *Applied Optics*, Vol.34, No. 18, pp.3240-3249. (doi: [10.1364/AO.34.003240](https://doi.org/10.1364/AO.34.003240))
- [27] Oh, D.B., and Hovde, D.C., (1995). Wavelength-modulation detection of acetylene with a near-infrared external-cavity diode laser. *Applied Optics*, Vol.34, No. 30, pp.7002-7005. (doi: [10.1364/AO.34.007002](https://doi.org/10.1364/AO.34.007002))
- [28] Sonnenfroh, D.M., and Allen, M.G., (1996). Ultrasensitive, visible tunable diode laser detection of NO₂. *Applied Optics*, Vol.35, No. 21, pp.4053-4058. (doi: [10.1364/AO.35.004053](https://doi.org/10.1364/AO.35.004053))
- [29] Kohns, P., Stoermann, R., Budzynski, E., Walte, R.N., Knoop, J., and Kuester, R., (1997). In-situ measurement of the water vapor concentration in industrial ovens by an user-friendly semiconductor laser system. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, Vol.3098, pp.544-551. (doi: [10.1117/12.281202](https://doi.org/10.1117/12.281202))
- [30] Furlong, E.R., Baer, D.S., and Hanson, R.K., (1998). Real-time adaptive combustion control using diode-laser absorption sensors. *Symposium (International) on Combustion*, Vol.27, No. 1, pp.103-111. (doi: [10.1016/S0082-0784\(98\)80395-0](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(98)80395-0))
- [31] Allendorf, S.W., Ottesen, D.K., Hardesty, D.R., Goldstein, D., Smith, C.W., and Malcolmson, A.P., (1998). Laser-based sensor for real-time measurement of off gas composition and temperature in BOF steelmaking. *Iron Steel Eng.*, Vol.75, No. 4, pp.31-35.
- [32] Mihalcea1, R.M., Webber, M.E., Baer, D.S., Hanson, R.K., Feller, G.S., and Chapman, W.B., (1998). Diode-laser absorption measurements of CO₂, H₂O, N₂O, and NH₃ near 2.0 μ m. *Applied Physics B*, Vol.67, No. 3, pp.283-288. (doi: [10.1007/s003400050507](https://doi.org/10.1007/s003400050507))
- [33] Ebert, V., Fitzer, J., Gerstenberg, I., Pleban, K.U., Pitz, H., Wolfrum, J., Jochem, M., and Martin, J., (1998). Simultaneous laser-based in situ detection of oxygen and water in a waste incinerator for active combustion control purposes. *Symposium (International) on Combustion*, Vol. 27, No. 1, pp.1301-1308. (doi: [10.1016/S0082-0784\(98\)80534-1](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(98)80534-1))

- [34] Winnewisser, G., Drascher, T., Giesen, T., Pak, I., Schmulling, F., Schieder, R., (1999). The tunable diode laser: a versatile spectroscopic tool. *Spectrochimica Acta Part A*, Vol. 55, No. 10, pp.2121-2142. (doi: [10.1016/S1386-1425\(99\)00084-0](https://doi.org/10.1016/S1386-1425(99)00084-0))
- [35] Carey, S.J., McCann, H., Hindle, F.P., Ozanyan, K.B., Winterbone, D.E., and Clough, E., (2000). Chemical species tomography by near infra-red absorption. *Chemical Engineering Journal*, Vol. 77, No. 1-2, pp.111-118. (doi: [doi:10.1016/S1385-8947\(99\)00139-4](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(99)00139-4))
- [36] Barrass S., Gérard Y., Holdsworth R.J., and Martin P.A., (2004). Near-infrared tunable diode laser spectrometer for the remote sensing of vehicle emissions. *Spectrochimica Acta Part A*, Vol. 60, No. 14, pp.3353–3360. (doi: [10.1016/j.saa.2003.11.038](https://doi.org/10.1016/j.saa.2003.11.038))
- [37] Liu, X., Jeffries, J. B., Hanson, R. K., Hinckley, K. M., and Woodmansee, M. A., (2006). Development of a tunable diode laser sensor for measurements of gas turbine exhaust temperature. *Applied Physics B*, Vol. 82, No. 3, pp.469-478, 2006. (doi: [10.1007/s00340-005-2078-9](https://doi.org/10.1007/s00340-005-2078-9))
- [38] Anderson, T. N., Lucht, R. P., Priyadarsan, S., Annamalai, K., and Caton, J. A., (2007). In situ measurements of nitric oxide in coal-combustion exhaust using a sensor based on a widely tunable external-cavity GaN diode laser. *Applied Optics*, Vol. 46, No. 19, pp.3946-3957. (PMID: [17571131](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17571131/))
- [39] Gieseler, H., Kessler, W.J., Finson, M., Davis, S. J., Mulhall, P. A., Bons, V., Debo, D. J., and Pikal, M. J., (2007). Evaluation of Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy for In-Process Water Vapor Mass Flux Measurements During Freeze Drying. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, Vol. 96, No. 7, pp.1776-1793. (doi: [10.1002/jps.20827](https://doi.org/10.1002/jps.20827))
- [40] Lackner, M., (2007). Tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) in the process industries- a review. *Reviews in Chemical Engineering*, Vol. 23, No. 2, pp.65-147. (doi: [10.1515/REVCE.2007.23.2.65](https://doi.org/10.1515/REVCE.2007.23.2.65))
- [41] Magnuson, J. K., Anderson, T.s N., and Lucht, R. P., (2008). Application of a Diode-Laser-Based Ultraviolet Absorption Sensor for in Situ Measurements of Atomic Mercury in Coal-Combustion Exhaust. *Energy & Fuels*, Vol. 22, No. 5, pp. 3029-3036. (doi: [10.1021/ef800372k](https://doi.org/10.1021/ef800372k))
- [42] Schaeffer, S.M., Miller, J.B., Vaughn, B.H., White, J.W.C., and Bowling, D.R., (2008). Long-term field performance of a tunable diode laser absorption spectrometer for analysis of carbon isotopes of CO₂ in forest air. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 8, No. 17, pp.5263-5277. (doi: [10.5194/acp-8-5263-2008](https://doi.org/10.5194/acp-8-5263-2008))
- [43] Lewander, M., Guan, Z.G., Persson, L., Olsson, A., and Svanberg, S., (2008). Food monitoring based on diode laser gas spectroscopy. *Appl Phys B*, Vol. 93, No. 2-3, pp.619-625. (doi: [10.1007/s00340-008-3192-2](https://doi.org/10.1007/s00340-008-3192-2))
- [44] Wang, C., and Sahay P., (2009). Breath analysis using laser spectroscopic techniques: breath biomarkers, spectral fingerprints, and detection limits. *Sensors*, Vol. 9, No. 10, pp. 8230-8262. (doi: [10.3390/s91008230](https://doi.org/10.3390/s91008230))

- [45] Schneid, S.C., Gieseler, H., Kessler, W.J., and Pikal, M.J., (2009). Non-Invasive Product Temperature Determination Primary Drying using Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, Vol. 98, No. 9, pp.3406–3418. (doi: [10.1002/jps.21522](https://doi.org/10.1002/jps.21522))
- [46] Frish, M.B., Wainner, R.T., Laderer, M.C., Green, B.D., and Allen, M.G., (2010). Standoff and miniature chemical vapor detectors based on tunable diode laser absorption spectroscopy. *IEEE Sensors Journal*, Vol. 10, No. 3, pp.639-646. (doi: [10.1109/JSEN.2009.2038536](https://doi.org/10.1109/JSEN.2009.2038536))
- [47] Goldenstein, C.S., Strand, C.L., Schultz, I.A., Sun, K., Jeffries, J.B., and Hanson, R.K., (2014). Fitting of calibration-free scanned-wavelength-modulation spectroscopy spectra for determination of gas properties and absorption lineshapes. *Applied Optics*, Vol.53, No.3, pp. 356-367. (doi: [10.1364/AO.53.000356](https://doi.org/10.1364/AO.53.000356))
- [48] Goldenstein, Spearrin, R. M., Schultz, I. A., Jeffries, J. B., and Hanson, R. K. , (2014). Wavelength-modulation spectroscopy near 1.4 μm for measurements of H_2O and temperature in high-pressure and -temperature gases. *Measurement Science and Technology*, Vol.25, No.5, pp, 055101. (doi:[10.1088/0957-0233/25/5/055101](https://doi.org/10.1088/0957-0233/25/5/055101))
- [49] Pogány, A., Klein, A., and Ebert, V., (2015). Measurement of water vapor line strengths in the 1.4–2.7 μm range by tunable diode laser absorption spectroscopy. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Vol.165, pp. 108-122. (doi: [10.1016/j.jqsrt.2015.06.023](https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2015.06.023).)
- [50] Pogány, A., Wagner, S., Werhahn, O., and Ebert, V., (2015). Development and Metrological Characterization of a Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS) Spectrometer for Simultaneous Absolute Measurement of Carbon Dioxide and Water Vapor. *Applied Spectroscopy*, Vol.69, pp.257-268. (<https://www.osapublishing.org/as/abstract.cfm?URI=as-69-2-257>.)
- [51] Blume, N.G., and Wagner, S., (2015). Broadband supercontinuum laser absorption spectrometer for multiparameter gas phase combustion diagnostics. *Optics Letters*, Vol.40, No.13, pp. 3141-3144. (doi: [10.1364/OL.40.003141](https://doi.org/10.1364/OL.40.003141).)
- [52] Liu, C., Xu, L., and Cao, Z., (2013). Measurement of nonuniform temperature and concentration distributions by combining line-of-sight tunable diode laser absorption spectroscopy with regularization methods. *Applied Optics*, Vol.52, No.20, pp.4827-4842. (doi: [10.1364/AO.52.004827](https://doi.org/10.1364/AO.52.004827).)
- [53] Li, F., Yu, X., Cai, W., and Ma, L., (2012). Uncertainty in velocity measurement based on diode-laser absorption in nonuniform flows. *Applied Optics*, Vol.51, No.20, pp.4788-4797. (doi: [10.1364/AO.51.004788](https://doi.org/10.1364/AO.51.004788).)
- [54] Kohse-Hoinghaus, K., and Jeffries, J. B., *Applied Combustion Diagnostics*, New York: Taylor and Francis, 2002.
- [55] Bolshov, M.A., Kuritsyn, Yu.A., Romanovskii, and Yu.V., (2015). Tunable diode laser spectroscopy as a technique for combustion diagnostics. *Spectrochimica ACTa - Part B Atomic SpeCTroscopy*, Vol.106, No.1, pp. 45-66. (doi:[10.1016/j.sab.2015.01.010](https://doi.org/10.1016/j.sab.2015.01.010).)

- [56] Huang, J., Zhang, H., Li, T., Lin, H., Svanberg, K., and Svanberg, S., (2015). Assessment of human sinus cavity air volume using tunable diode laser spectroscopy, with application to sinusitis diagnostics. *Journal of biophotonics*, Vol. 8, No.11, pp.985–992. (doi: [10.1002/jbio.201500110](https://doi.org/10.1002/jbio.201500110).)
- [57] Kasyutich, V.L., Poulidi, D., Jalil, M., Metcalfe, I.S., and Martin, P.A., (2013). Application of a cw quantum cascade laser CO₂ analyser to catalytic oxidation reaction monitoring. *Applied Physics B*, Vol.10, No.2, pp.263-269. (doi:[10.1007/s00340-012-5154-y](https://doi.org/10.1007/s00340-012-5154-y).)
- [58] Proschek, V., Kirchengast, G., Schweitzer, S., Brooke, J.S.A., Bernath, P.F., Thomas, C.B., Wang, J-G, Tereszchuk, K.A., Abad, G. G., Hargreaves, R.J., Beale, C.A., Harrison, J.J., Martin, P.A., Kasyutich, V.L., Gerbig, C., Kolle, O., and Loescher, A., (2015). Retrieval and validation of carbon dioxide, methane and water vapor for the Canary Islands IR-laser occultation experiment. *Atmospheric Measurement Techniques*, Vol.8, pp.3315-3336. (doi:[10.5194/amt-8-3315-2015](https://doi.org/10.5194/amt-8-3315-2015).)
- [59] Linnerud, I., Kaspersen, P., and Jæger, T., (1989). Gas monitoring in the process industry using diode laser spectroscopy. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, Vol.67, No.3, pp.297-305. (doi: [10.1007/s003400050509](https://doi.org/10.1007/s003400050509).)
- [60] Ma, J., Cheesman, A., Ashfold, M. N. R., Hay, K. G., Wright, S., Langford, N., Duxbury, G., and A.Mankelevich, Y., (2009). Quantum cascade laser investigations of CH₄ and C₂H₂ interconversion in hydrocarbon/H₂ gas mixtures during microwave plasma enhanced chemical vapor deposition of diamond. *Journal of Applied Physics*, Vol.106, No. 3, pp.033305/1-033305/15. (doi: [10.1063/1.3176971](https://doi.org/10.1063/1.3176971).)
- [61] Hopfe, V., Sheel, D.W., Spee, C.I.M.A., Tell, R., Martin, P., Beil, A., Pemble, M., Weiss, R., Vogth, U., and Graehlerta, W., (2003). In-situ monitoring for CVD processes. *Thin Solid Films*, Vol. 442, No.1-2, pp. 60–65. (doi:[10.1016/S0040-6090\(03\)00943-X](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(03)00943-X).)
- [62] Deguchi, Y., Noda, M., and Abe, M., (2002). Improvement of combustion control through real-time measurement of O₂ and CO concentrations in incinerators using diode laser absorption spectroscopy. *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.29, No.1, pp.147-153. (doi:[10.1016/S1540-7489\(02\)80023-2](https://doi.org/10.1016/S1540-7489(02)80023-2))
- [63] Sur, R., Sun, K., Jeffries, J.B., Socha, J.G., and Hanson, R.K., (2015). Scanned-wavelength-modulation-spectroscopy sensor for CO, CO₂, CH₄ and H₂O in a high-pressure engineering-scale transport-reactor coal gasifier. *Fuel*, Vol.150, pp.102-111. (doi:[10.1016/j.fuel.2015.02.003](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.02.003).)
- [64] Chao, X., Jeffries, J. B., and Hanson, R. K., (2013). Real-time, in situ, continuous monitoring of CO in a pulverized-coal-fired power plant with a 2.3 μm laser absorption sensor. *Applied Physics B*, Vol. 110, No.3, pp.359-365. (doi: [10.1007/s00340-012-5262-8](https://doi.org/10.1007/s00340-012-5262-8).)
- [65] Goldenstein, C.S., Almodóvar, C.A., Jeffries, J.B., Hanson, R.K., and Brophy, C.M., (2014). High-bandwidth scanned-wavelength-modulation spectroscopy sensors for temperature and H₂O in a rotating detonation engine. *Measurement Science and Technology*, Vol.25, No.10, pp.105104. (doi:[10.1088/0957-0233/25/10/105104](https://doi.org/10.1088/0957-0233/25/10/105104).)

- [66] Goldenstein, C. S., Schultz, I. A., Spearrin, R. M., Jeffries, J. B., and Hanson, R. K., (2014). Scanned-wavelength-modulation spectroscopy near 2.5 μm for H_2O and temperature in a hydrocarbon-fueled scramjet combustor. *Applied Physics B*, Vol. 116, No.3, pp.717-727. (doi:[10.1007/s00340-013-5755-0](https://doi.org/10.1007/s00340-013-5755-0).)
- [67] Spearrin, R. M., Goldenstein, C. S., Schultz, I. A., Jeffries, J. B., and Hanson, R. K., (2014). Simultaneous sensing of temperature, CO, and CO_2 in a scramjet combustor using quantum cascade laser absorption spectroscopy. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, Vol.117, No.2, pp. 689-698. (doi:[10.1007/s00340-014-5884-0](https://doi.org/10.1007/s00340-014-5884-0).)
- [68] Stritzke, F., Diemel, O., and Wagner, S., (2015). TDLAS-based NH_3 mole fraction measurement for exhaust diagnostics during selective catalytic reduction using a fiber-coupled 2.2- μm DFB diode laser. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, Vol.119, No.1, pp.143-152. (doi:[10.1007/s00340-015-6073-5](https://doi.org/10.1007/s00340-015-6073-5).)
- [69] Jatana, G.S., Magee, M., Fain, D., Naik, S.V., Shaver, G.M., and Lucht, R.P., (2015). Simultaneous high-speed gas property measurements at the exhaust gas recirculation cooler exit and at the turbocharger inlet of a multicylinder diesel engine using diode-laser-absorption spectroscopy. *Applied Optics*, Vol. 54, No.5, pp. 1220-1231. (doi: [10.1364/AO.54.001220](https://doi.org/10.1364/AO.54.001220).)
- [70] Jatana, G.S., Naik, S.V., Shaver, G.M., and Lucht, R.P., (2013). High-speed diode laser measurements of temperature and water vapor concentration in the intake manifold of a diesel engine. *International Journal of Engine Research*, Vol.15, No.7, pp.773-788. (doi: [10.1177/1468087413517107](https://doi.org/10.1177/1468087413517107).)
- [71] Yamakage, M., Muta, K., Deguchi, Y., Fukada, S., Iwase, T., and Yoshida, T., (2008). Development of Direct and Fast Response Exhaust Gas Measurement. *Flow Measurement and Instrumentation*, SAE Paper, 20081298. (doi:[10.4271/2008-01-0758](https://doi.org/10.4271/2008-01-0758).)
- [72] Kasyutich, V. L., Holdsworth, R. J., and Martin, P. A., (2009). In situ vehicle engine exhaust measurements of nitric oxide with a thermoelectrically cooled cw DFB quantum cascade laser. *Journal of Physics: Conference Series* Vol.157, pp. 012006. (doi:[10.1088/1742-6596/157/1/012006](https://doi.org/10.1088/1742-6596/157/1/012006))
- [73] Sumizawa, H., Yamada, H., and Tonokura, K., (2010). Real-time monitoring of nitric oxide in diesel exhaust gas by mid-infrared cavity ring-down spectroscopy. *Applied Physics B*, Vol.100, No.4, pp. 925-931. (doi: [10.1007/s00340-010-4138-z](https://doi.org/10.1007/s00340-010-4138-z).)
- [74] Rawlins, W. T., Hensley, J. M., Sonnenfroh, D. M., Oakes, D. B., Allen, and Mark G., (2005). Quantum cascade laser sensor for SO_2 and SO_3 for application to combustor exhaust streams. *Applied optics*, Vol.44, No.31, pp.6635-43. (doi: [10.1364/AO.44.006635](https://doi.org/10.1364/AO.44.006635).)
- [75] Kranendonk, L. A., Walewski, J. W., Kim, T., and Sanders, S. T., (2005). Wavelength-agile sensor applied for HCCI engine measurements. *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.30, No.1, pp.1619–1627. (doi:[10.1016/j.proci.2004.08.211](https://doi.org/10.1016/j.proci.2004.08.211).)
- [76] Rieker, G.B. , Li, H., Liu, X. , Liu, J.T.C. , Jeffries, J.B., Hanson, R.K., Allen, M.G. , Wehe, S.D. , Mulhall, P.A. , Kindle, H.S., Kakuho, A., Sholes, K.R., Matsuura, T. , and Takatani, S., (2007). Rapid measurements of temperature and H_2O concentration in IC engines with a spark plug-mounted

diode laser sensor. *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 31, No.2, pp.3041–3049. (doi:10.5194/amt-8-3315-2015.)

- [77] Rothman, L.S. , Gordon, I.E. , Babikov, Y., Barbe, A., ChrisBenner,D. , Bernath,P.F. , Birk,M., Bizzocchi, L., Boudon, V., Brown, L.R., Campargue, A., Chance, K., Cohen, E.A., Coudert, L.H., Devi, V.M., Drouin, B.J., Fayt, A., Flaud, J.-M., Gamache, R.R., Harrison, J.J., Hartmann, J.-M., Hill, C., Hodges, J.T., Jacquemart, D., Jolly, A., Lamouroux, J., LeRoy, R.J., Li, G., Long, D.A., Lyulin, O.M., Mackie, C.J., Massie, S.T., Mikhailenko, S., Müller, H.S.P., Naumenko, O.V., Nikitin, A.V., Orphal, J., Perevalov, V., Perrin, A., Polovtseva, E.R., Richard, C., Smith, M.A.H., Starikova, E., Sung, K., Tashkun, S., Tennyson, J., Toon, G.CTyuterev, Vl.G., and Wagner., G. ,(2013). The HITRAN2012 molecular spectroscopic database. *Journal of Quantitative SpeCTroscopy & Radiative Transfer*, Vol. 130, pp. 4-50. (doi: Journal of Quantitative SpeCTroscopy & Radiative Transfer - Elsevier)
- [78] McCann, H., Wright, P., and Daun, K., *Chemical species tomography*, Industrial Tomography: Systems and Applications, Inc. Elsevier 2015, pp. 135-174.
- [79] Deguchi, Y., Kamimoto, T., Wang, Z.Z., Yan, J.J., Liu, J.P., Watanabe, H., Kurose, R., (2014). Applications of laser diagnostics to thermal power plants and engines. *Applied Thermal Engineering*, Vol.73, No.2, pp.1453-1464. (doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.05.063.)
- [80] Tsekenis, S. A., Tait, N., and McCann, H., (2015). Spatially resolved and observer-free experimental quantification of spatial resolution in tomographic images. *Review of Scientific Instruments*, Vol.86, No.3, pp. 035104. (doi: 10.1063/1.4913922.)
- [81] An, X., Brittelle, M. S., Lauzier, P. T., Gord, J. R., Roy, S., Chen, G., and Sanders., S. T., (2015). Demonstration of temperature imaging by H2O absorption spectroscopy using compressed sensing tomography. *Applied Optics*, Vol. 54, No.31, pp.9190-9199. (doi: 10.1364/AO.54.009190.)
- [82] Seidel, A., Wagner, S., Dreizler, A., and Ebert, V., (2015). Robust, spatially scanning, open-path TDLAS hygrometer using retro-reflective foils for fast tomographic 2D water vapor concentration field measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, Vol. 8, No.5, pp. 2061-2068. (doi:10.5194/amt-8-2061-2015.)
- [83] Kamimoto, T., Deguchi, Y., Zhang, N., Nakao, R., Takagi, T., and Zhang, J. Z., (2015). Real-time 2D concentration measurement of CH4 in oscillating flames using CT tunable diode laser absorption spectroscopy. *Journal of Applied Nonlinear Dynamics*, Vol.4, No.3, pp. 295 ~ 303. (doi: 10.5890/JAND.2015.09.009.)
- [84] Kamimoto, T., Deguchi, Y., and Kiyota, Y., (2015). High temperature field application of two dimensional temperature measurement technology using CT tunable laser absorption spectroscopy. *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol.46.No.A, pp.51–57. (doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2015.09.006)

- [85] Deguchi, Y., Kamimoto, T., and Kiyota, Y., (2015). Time Resolved 2D Concentration and Temperature Measurement using CT Tunable Laser Absorption Spectroscopy. *Flow Measurement and Instrumentation*, *In press*. (doi: [10.1016/j.flowmeasinst.2015.06.025](https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2015.06.025).)
- [86] Ma, L., and Cai, W., (2008). Numerical investigation of hyperspectral tomography for simultaneous temperature and concentration imaging. *Applied Optics*, Vol. 47, No. 21, pp. 3751-3759. (doi: [10.1364/AO.47.003751](https://doi.org/10.1364/AO.47.003751).)
- [87] Cai, W., and Kaminski, C.F., (2015). A tomographic technique for the simultaneous imaging of temperature, chemical species, and pressure in reactive flows using absorption spectroscopy with frequency-agile lasers. *Applied Physics Letters*, Vol. 104, No. 3, pp. 034101. (doi: [10.1063/1.4862754](https://doi.org/10.1063/1.4862754).)
- [88] Cai, W., and Kaminski, C.F., (2015). A numerical investigation of high resolution multispectral absorption tomography for flow thermometry. *Applied Physics B*, Vol. 119, No. 1, pp. 29-35. (doi: [10.1007/s00340-015-6012-5](https://doi.org/10.1007/s00340-015-6012-5).)
- [89] Cai, W., and W. Kaminski, W., (2014). Multiplexed absorption tomography with calibration-free wavelength modulation spectroscopy. *Applied Physics Letters*, Vol. 104, No. 15, pp. 154106. (doi: [10.1063/1.4871976](https://doi.org/10.1063/1.4871976).)
- [90] Hong, Y., Song, J., Wang, G., and Pan, H., (2015). Optimal beam arrangement design for two-dimensional temperature and concentration reconstruction using ASA and SQP algorithms. *Optik*, Vol. 126, No. 2, pp. 292-296. (doi: [10.1016/j.ijleo.2014.08.162](https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2014.08.162).)
- [91] Shao, J., Wang, L., and Ying, C., (2015). Numerical investigation of the two-dimensional gas temperature distribution based on tunable diode laser absorption spectroscopy. *Optica Applicata*, Vol. 45, No. 2, pp. 183--198. (doi: [10.5277/oa150205](https://doi.org/10.5277/oa150205).)
- [92] Liu, C., Xu, L., Cao, Z., and McCann, H., (2014). Reconstruction of Axisymmetric Temperature and Gas Concentration Distributions by Combining Fan-Beam TDLAS With Onion-Peeling Deconvolution. *Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 63, No. 12, pp. 3067-3075. (doi: [10.1109/TIM.2014.2315737](https://doi.org/10.1109/TIM.2014.2315737).)
- [93] An, X., Kraetschmer, T., Takami, K., Sanders, S. T., Ma, L., Cai, W., Li, X., Roy, S., and Gord, J. R., (2011). Validation of temperature imaging by H₂O absorption spectroscopy using hyperspectral tomography in controlled experiments. *Applied Optics*, Vol. 50, No. 40, pp. A29-A37. (doi: [10.1364/AO.50.000A29](https://doi.org/10.1364/AO.50.000A29).)
- [94] Wang, F., Wu, Q., Huang, Q., Yan, J., and Cen, K. F., (2015). Simultaneous measurement of 2 dimensional H₂O concentration and temperature distribution in premixed methane/air flame using TDLAS-based tomography technology. *Optics Communications*, Vol. 346, No. 1, pp. 53-63. (doi: [10.1016/j.optcom.2015.02.015](https://doi.org/10.1016/j.optcom.2015.02.015).)
- [95] Wang, F., Cen, K. F., Li, N., Jeffries, J. B., Huang, Q. X., Yan, J. H., and Chi, Y., (2010). Two-dimensional tomography for gas concentration and temperature distributions based on tunable diode

- laser absorption spectroscopy. *Measurement Science and Technology*, Vol. 21, No.4, pp. 045301. (doi:10.1088/0957-0233/21/4/045301.)
- [96] Song, J., Hong, Y., Wang, G., and Pan, H., (2013). Algebraictomographic reconstruction of two-dimensional gas temperature based on tunable diode laser absorption spectroscopy. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, Vol.112, No.4, pp.529-537. (doi: [10.1007/s00340-013-5435-0](https://doi.org/10.1007/s00340-013-5435-0).)
- [97] Kasyutich, V.L., and Martin, P.A., (2011). Towards a two-dimensional concentration and temperature laser absorption tomography sensor system. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, Vol.102, No.1, pp. 149-162. (doi: [10.1007/s00340-010-4123-6](https://doi.org/10.1007/s00340-010-4123-6).)
- [98] Wright, P., Terzijaa, N., Davidsona, J. L., Garcia-Castillo, S., Garcia-Stewart, C., Pegrumb, S., Colbourneb, S., Turnerb, P., Crossleyc, S. D., Litt, T., Murrayc, S., Ozanyana, K. B., and McCanna, H., (2010). High-speed chemical species tomography in a multi-cylinder automotive engine. *Chemical Engineering Journal*, Vol.158, No.1, pp. 2–10. (doi:10.1016/j.cej.2008.10.026.)
- [99] Ma, L., Li, X., Sanders, S.T., Caswell, A.W., Roy, S., Plemmons, D.H., and Gord, J.R., (2013). 50-kHz-rate 2D imaging of temperature and H₂O concentration at the exhaust plane of a J85 engine using hyperspectral tomography. *Optics Express*, Vol.21, No.1, pp.1152-1162. (doi: [10.1364/OE.21.001152](https://doi.org/10.1364/OE.21.001152).)
- [100] Choi, D.-W., Jeon, M.-G., Cho, G.-R., Kamimoto, T., Deguchi, Y. and Doh, D.-H., (2016). Performance improvements in temperature reconstructions of 2-D tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS). *Journal of Thermal Science*, Vol.25, No.1, pp. 84-89. (doi: [10.1007/s11630-016-0837-z](https://doi.org/10.1007/s11630-016-0837-z))
- [101] Tachibana, S., Kanai, K., Yoshida, S., Suzuki, K., and Sato, T., (2015). Combined effect of spatial and temporal variations of equivalence ratio on combustion instability in a low-swirl combustor. *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.35, No.3, pp. 3299–3308. (doi: [10.1016/j.proci.2014.07.024](https://doi.org/10.1016/j.proci.2014.07.024))

謝辞

本研究および学位論文の作成は、指導教官である出口祥啓教授をはじめ、多数の方々のご指導、ご協力により成り立っていることをここに示し、感謝の意を表します。特に、終始熱心にご指導頂いた出口祥啓教授に厚く御礼申し上げます。本当にありがとうございました。なお、本研究で3.6・4.6節“開発用燃焼炉を用いた微粉炭燃焼場における2次元温度分布計測”は電力中央研究所殿、3.7・4.7節“ガスタービン燃焼器モデルを用いた2次元メタン分布計測”は宇宙航空研究開発機構殿の共同研究により推進されました。電力中央研究所の泰中様、丹野様、宇宙航空研究開発機構の立花様、他、関係者には多大なるご指導、ご助言をいただきました。ここに謝意を示します。

ご指導・ご協力頂いた方々(順不同)

・徳島大学工学部機械工学科

出口祥啓 教授
村本之絵 氏
森本努 氏
玉谷純二 氏
佐藤哲也 氏
大崎貴之 氏
宮本康平 氏
島村豪敏 氏
片岡由樹 氏
飯田仁氏

・電力中央研究所

泰中一樹 氏
丹野賢二 氏

・宇宙航空研究開発機構

立花繁 氏

・九州大学

渡邊裕章 氏

・京都大学

黒瀬良一 氏

・レーザ・プラズマ研究室院生

勝森俊平 氏
高木琢 氏
中尾亮介 氏
生友章裕 氏
SAFIUL ALAM 氏
劉人瑋 氏

MINGYU JEON 氏
GIRASE GAJENDRASING KRUNAL 氏
南 维刚 氏

・ レーザ・プラズマ研究室学部生

小松原龍馬 氏
斉藤圭太 氏
中川真人 氏
森悠馬 氏